

**IV. Метрология и метрологическое обеспечение**

УДК 006.92

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО  
ЭТАЛОНА КООРДИНАТ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ В ЧАСТИ  
ИЗМЕРЕНИЙ АСТРОНОМИЧЕСКОГО АЗИМУТА**

**М.А. Ханзадян**

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл., Россия,  
hma@vniiftri.ru

*Аннотация. В конце 2020 года во ФГУП «ВНИИФТРИ» для решения задач метрологического обеспечения существующих и перспективных средств измерений азимута был разработан стационарный комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута (КСМО СИА), образующий составную часть государственного первичного специального эталона координат местоположения.*

*В рамках государственных испытаний государственного первичного специального эталона координат местоположения проведено исследование метрологических характеристик в части измерений астрономического азимута. В процессе исследований была разработана модель погрешности измерений, отражающая составные части и компоненты, оказывающие влияние на азимутальные измерения эталоном.*

*В настоящее время такие исследования проводятся впервые, имеют большой теоретический и практический смысл, а также являются актуальными в связи с широким применением азимутальных средств измерений во многих отраслях.*

*Ключевые слова: неисключённая систематическая погрешность, астрономический азимут, стационарный комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута, государственный первичный эталон координат местоположения.*

**STUDY OF METROLOGICAL CHARACTERISTICS  
OF THE STATE PRIMARY STANDARD OF LOCATION  
COORDINATES IN PART OF MEASUREMENTS  
OF ASTRONOMICAL AZIMUTH**

**M.A. Khanzadyan**

FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region, Russia,  
hma@vniiftri.ru

*Abstract. At the end of 2020, in order to solve the problems of metrological support of existing and perspective azimuth measuring instruments a stationary Complex of Metrological Support Tools of Azimuth Measuring Instruments (CMST AMI) was developed in FSUE "VNIIFTRI", which forms the part of the state primary special standard of location coordinates.*

*During the state tests of the state primary special standard of location coordinates, the study of metrological characteristics in terms of measurements of astronomical azimuth was conducted. In the process of research, a measurement error model was developed, describing the constituent parts and components influencing on the azimuthal measurements of the standard.*

*At present, such researches were performed for the first time, have great theoretical and practical impact and are also relevant due to the extensive use of azimuthal measurement results in many industries.*

*Keywords: non-excluded systematic error, astronomical azimuth, stationary complex of metrological support tools of azimuth measuring instruments, state primary standard of location coordinates.*

## **Введение**

В настоящее время измерения астрономического азимута занимают важное место во многих отраслях. На сегодняшний день без результатов астрономического азимута не обходится ни одна стартовая площадка для космических аппаратов. Вся навигационная, бортовая и гироскопическая аппаратура космических, авиационных и корабельных систем различного уровня и назначения полностью опирается на результаты измерения астрономического азимута при движении на большие расстояния. В области геодезии и картографии результаты астрономических определений азимута лежат в основе установления земных и государственных систем координат. Значения астрономического азимута широко используются в области маркшейдерии при строительстве и ориентировании туннелей метрополитена и не только.

Для выполнения астрономо-геодезических и гироскопических работ по определению азимута используется узкоспециализированное оборудование, которое попадает в сферу государственного регулирования [15]. В связи с этим должна быть обеспечена прослеживаемость к государственным первичным эталонам Российской Федерации (РФ).

Все средства измерений азимута относятся к угломерным приборам, однако информация о них отсутствует в Государственной поверочной схеме для средств измерений плоского угла. В существующих методиках поверки для средств измерений азимута используются фундаментальные пункты пространственных полигонов и базисов. Азимуты на таких полигонах и базисах определяются средствами измерений, которые в дальнейшем проходят на них процедуру поверки и калибровки. Кроме этого, в существующей нормативной документации и терминологии метрологии отсутствует понятие единицы «астрономический азимут».

Для решения накопившихся проблем в области метрологического обеспечения существующих и перспективных средств измерений азимута в 2021 г. во ФГУП «ВНИИФТРИ» была проведена работа по созданию Государственного первичного специального эталона координат местоположения (ГПСЭК), содержащего Стационарный комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута.

ГПСЭК в части измерений азимута предназначен для воспроизведения, хранения и передачи эталонного значения астрономического азимута направления средствам измерений. Достоверность и надёжность результатов измерений астрономического азимута напрямую зависит от источников погрешности. Оценить влияние источников погрешности возможно, установив модель погрешности измерений. Этим и другим научным исследованиям и наблюдениям посвящена данная работа.

### Описание эталона

ГПСЭК состоит из лабораторного комплекса и сети наружных пунктов, образующих азимутальный полигон (рис. 1). Эталон в части измерений азимута состоит из следующих частей:

- автоматическая система астрономического азимутального ориентирования, основанная на измерениях оптико-электронного астровизира (ОЭАВ);
- оптический хранитель азимутальных направлений;
- комплекс средств передачи и сравнения шкал времени.

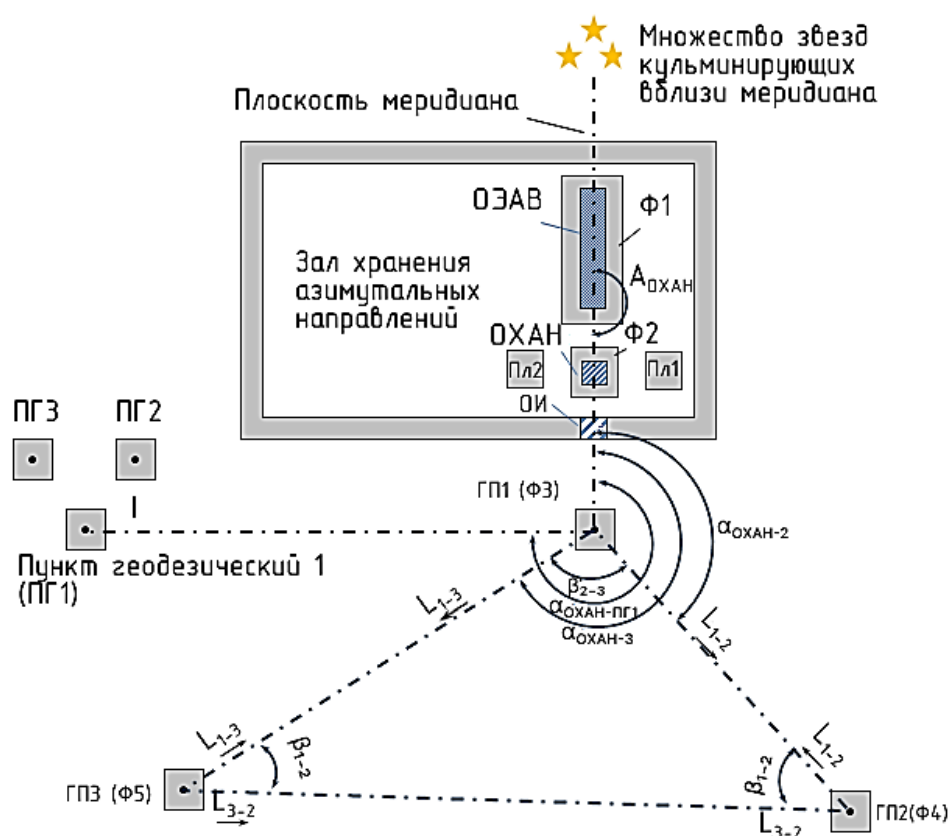


Рис. 1. Схема измерений КСМО СИА

Оптико-электронный астровизир является основным средством измерения астрономического азимута. Он работает в двух режимах измерений [13]: первый режим — это непосредственно режим измерений астрономического азимута визирной оси и азимута блока зеркально-призменного [14] (БЗП); второй — это режим передачи измеренного значения астрономического азимута с вертикальной грани зеркальной плоскости блока зеркально-призменного с помощью автоколлиматора на внутреннюю зеркальную грань оптического хранителя азимутальных направлений [14] (ОХАН).

Принцип работы ОЭАВ заключается в определении азимута нормали к грани ОХАН из многократных наблюдений множества звёзд, кульминирующих вблизи меридиана, на матрице фотоприёмного устройства камеры телевизионной, а также идентификации положения звёзд по астрономическим каталогам с привязкой результата к шкале времени UTC (SU) [13, 14] (рис. 2).

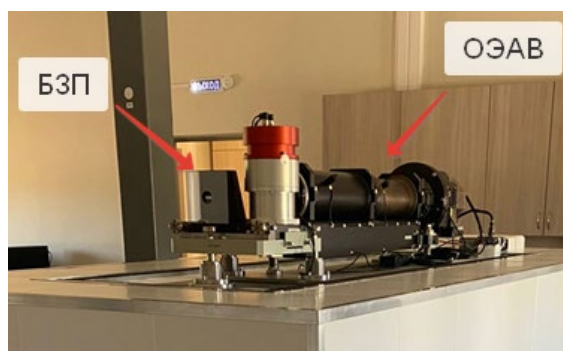


Рис. 2. Общий вид ОЭАВ

Оптический хранитель азимутальных направлений — это четырёхгранная зеркальная призма с аттестованными значениями углов между гранями, установленная на одной оптической оси с астровизиром, предназначенная для хранения исходных направлений и передачи азимутов этих направлений гироскопическим, астрономическим и навигационным средствам измерений азимута [9, 10] (рис. 3).

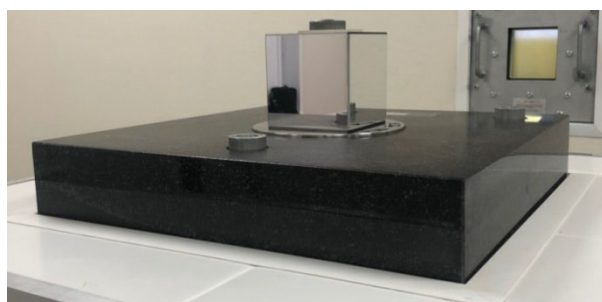


Рис. 3. Внешний вид ОХАН

### Исследование метрологических характеристик ГПСЭК в части НСП измерений азимута

Астрономический азимут нормали к зеркальной грани ОХАН из измерений ОЭАВ определяется по формуле [5]:

$$An_{ij} = A_{BO_{ij}} + \Delta A_n + \Delta A_{СП}. \quad (1)$$

Астрономический азимут визирной оси ОЭАВ  $A_{BO_{ij}}$  определяется по формуле [4]:

$$A_{BO_{ij}} = \arctg \left( \frac{\sin(s - \alpha_{BO_{ij}})}{\sin(\varphi_Z) \cos(s - \alpha_{BO_{ij}}) - \cos(\varphi_Z) \operatorname{tg}(\delta_{BO_{ij}})} \right), \quad (2)$$

где  $\alpha_{BO_{ij}}$ ,  $\delta_{BO_{ij}}$  — экваториальные координаты звезды;  $\varphi_Z$  — астрономическая широта места ОЭАВ;  $s = \theta_{GST} + 1,00274T - 0,00274\lambda_Z$  — местное звёздное время, соответствующее моменту регистрации изображения звёзд;  $\theta_{GST}$  — Гринвичское истинное звёздное время;  $T$  — местное время, ч.

Поправка  $\Delta A_n$ , обусловленная влиянием наклона БЗП относительно плоскости горизонта:

$$\Delta A_n = -\psi_{дг} \cdot \operatorname{tg}(h_0). \quad (3)$$

Поправка  $\Delta A_{СП}$ , обусловленная влиянием смещения мгновенного полюса относительно среднего:

$$\Delta A_{СП} = -(x_p \sin \lambda_Z + y_p \cos \lambda_Z) \sec \varphi_Z, \quad (4)$$

где  $\lambda_Z$  — астрономическая долгота места ОЭАВ;  $x_p, y_p$  — смещение координат мгновенного полюса.

С учётом формул (2)–(4) модель погрешности измерений состоит из ряда неисключённых систематических погрешностей (НСП), обусловленных влиянием следующих компонентов:

- $\theta_\alpha, \theta_\delta$  — погрешность звёздных каталогов;
- $\theta_{\varphi_Z}, \theta_{\lambda_Z}$  — погрешность определения астрономических координат места;
- $\theta_E$  — погрешность дискретности матрицы фотоприёмного устройства (ФПУ);
- $\theta_{\psi_{дг}}$  — погрешность, обусловленная влиянием наклона БЗП относительно плоскости горизонта;
- $\theta_{t_{UTC}}$  — погрешность, вызванная временем начала экспозиции кадра звёздного времени в шкале UTC;
- $\theta_{x_p}, \theta_{y_p}$  — погрешность определения смещения координат мгновенного полюса;
- $\theta_{f_{БЗП}}, \theta_{f_{БЗП}}$  — погрешность аттестации углов БЗП;
- $\theta_{r_{ОХАН}}$  — погрешность калибровки взаимного положения граней БЗП и ОХАН;
- $\theta_y$  — погрешность, обусловленная влиянием отклонения светового луча окном оптическим.

### Погрешность звёздных каталогов

Принцип работы ОЭАВ основан на регистрации и идентификации положения звёзд в определенный момент времени в кадре звёздного неба по трём астрономическим звёздным каталогам HIPPARCOS, FK6, PPMXL (рис. 4).

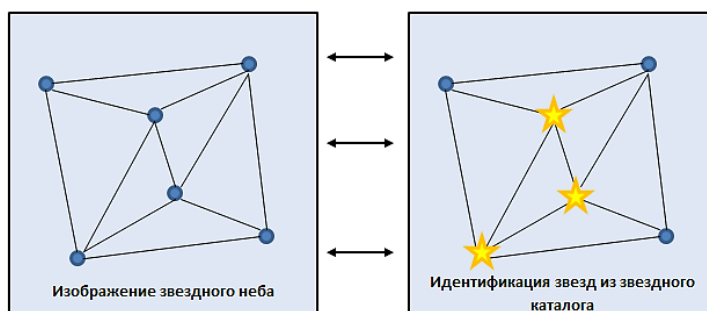


Рис. 4. Процесс регистрации и идентификации звёзд

Самым многочисленным звёздным каталогом является PPMXL, содержащий до 900 млн звёзд, СКО определения координат —  $0,08''$ , систематическая погрешность —  $0,01''$ . Для оценки влияния на результат измерений азимута использовалась погрешность этого каталога.

Из представленных результатов в таблице 1 следует, что вносимая погрешность звёздных каталогов в результат измерений астрономического азимута существенно меньше на порядки, чем остальные составляющие погрешности, поэтому её можно не учитывать при дальнейших вычислениях.

Таблица 1

Результаты влияния погрешности звёздных каталогов на измерение астрономического азимута визирной оси

Коэффициент изменения экваториальных координат ( $\alpha$ , $\delta$ )	Азимут визирной оси	Изменение астрономического азимута
—	$359^{\circ}59'31,11094339''$	—
$0,02''$	$359^{\circ}59'31,11095132''$	$8 \cdot 10^{-6}$
$0,04''$	$359^{\circ}59'31,11095924''$	$16 \cdot 10^{-6}$
$0,06''$	$359^{\circ}59'31,11096716''$	$24 \cdot 10^{-6}$
$0,08''$	$359^{\circ}59'31,11097508''$	$32 \cdot 10^{-6}$

### Погрешность дискретности матрицы ФПУ

На ОЭАВ установлена 20-мегапиксельная CMOS-матрица CMV20000 фирмы Cmosis, размером  $5120 \times 3840$  пикселей, фокусным расстоянием 699 мм и погрешностью синхронизации камеры телевизионной в шкале UTC 5 мс.

Для определения координат центра изображения в программном алгоритме обработки используется метод средневзвешенного центра или метод нахождения фотометрического центра [1, 8].

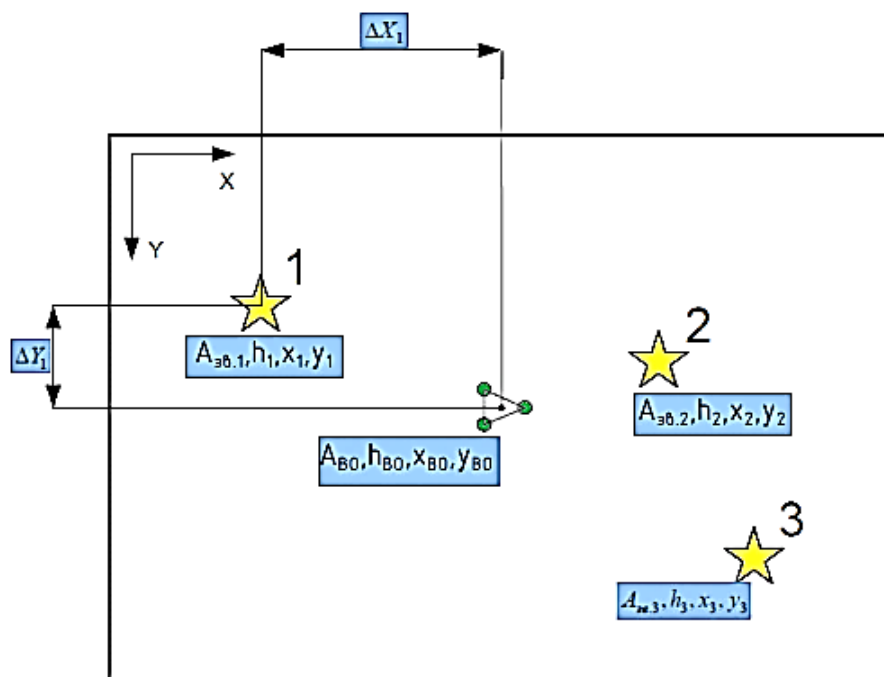


Рис. 5. Процесс определения координат центра звезды и визирной оси ОЭАВ с вычислением астрономического азимута

Погрешность определений координат центров изображений звёзд и центра марки визирной оси можно вычислить по приближённой формуле:

$$E = \arctg \left( \frac{l_p}{F} \right) \rho \cdot 0,05, \quad (5)$$

где  $l_p$  — линейный размер пикселя;  $F$  — количество секунд в 1 радиане, равное 206265".

По формуле (3) погрешность определений координат центров изображений составляет не более  $\theta_E = 0,1''$ .

В среднем ОЭАВ идентифицирует 20 звёзд, поэтому погрешность определения координат центра звезды будет оказывать влияние на итоговое значение азимута в неявном виде по формуле (4):

$$c_E = \frac{1}{\sqrt{n}} = 0,2, \quad (6)$$

где  $c_E$  — коэффициент чувствительности;  $n$  — количество идентифицированных звёзд.

### Погрешность определения времени начала экспозиции кадра звёздного неба в шкале UTC

Склонение наблюдаемых звёзд на широте 56 вычисляется по формуле [7, 11, 12]:

$$\delta_0 = 90^\circ - \varphi_Z + h_0, \quad (7)$$

где  $\varphi_Z$  — астрономическая широта места установки ОЭАВ, равная  $56^\circ$ ;  $h_0$  — высота визирования, равная  $40^\circ$ .

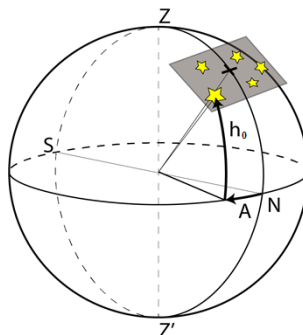


Рис. 6. Высота визирной оси

По формуле (5) склонение наблюдаемых звёзд равно  $\delta_0 = 74^\circ$ .

Скорость изменения азимута будет зависеть от скорости вращения Земли и склонения наблюдаемых звёзд по формуле:

$$v_A = \omega \cdot \cos(\delta_0), \quad (8)$$

где  $\omega = 15^\circ/\text{ч}$  — угловая скорость вращения Земли.

Скорость изменения азимута по формуле (6) составит  $v_A = 4,6^\circ/\text{ч}$ .

Погрешность определения времени начала экспозиции кадра звёздного неба в шкале UTC зависит от скорости изменения азимута и погрешности синхронизации камеры телевизионной в шкале UTC.

$$t_{UTC} = v_A \cdot t_{\text{синх}}, \quad (9)$$

где  $t_{\text{синх}} = 5 \text{ мс}$  — предельная погрешность привязки к шкале UTC.

Погрешность определения времени начала экспозиции кадра звёздного неба в шкале составила UTC  $t_{UTC} = 0,02''$ .

### Погрешность, обусловленная влиянием наклона БЗП относительно плоскости горизонта

Погрешность наклона относительно плоскости горизонта определяется по формуле (3), где  $\psi_{\text{дг}}$  — наклон БЗП относительно плоскости горизонта в поперечном направлении (рис. 4).



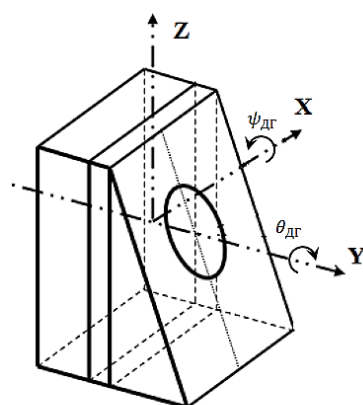


Рис. 7. Влияние поперечного наклона контрольного элемента БЗП

Погрешность влияния компоненты  $\Delta A_n$  в соответствии с формулой (3):

$$m_{\Delta A_n}^2 = \left( \frac{\partial \Delta A_n}{\partial \psi_{дг}} \right)^2 \cdot m_{\psi_{дг}}^2 + \left( \frac{\partial \Delta A_n}{\partial h_0} \right)^2 \cdot m_{h_0}^2, \quad (10)$$

где  $m_{\psi_{дг}}^2$  — погрешность определения измерения углов наклона, угл. сек;  $m_{h_0}^2$  — погрешность аттестации угла визирования зеркальной грани БЗП, угл. сек;  $\left( \frac{\partial \Delta A_n}{\partial \psi_{дг}} \right), \left( \frac{\partial \Delta A_n}{\partial h_0} \right)$  — коэффициенты чувствительности составляющих погрешностей.

В таблице 2 приведены параметры расчёта погрешности, вызванной влиянием наклона БЗП относительно плоскости горизонта.

Таблица 2

Параметры расчёта погрешности вычисления  $\Delta A_n$

Параметр	Значение
$m_{\psi_{дг}}$	0,003"
$m_{h_0}$	0,11"
$\frac{\partial \Delta A_n}{\partial \psi_{дг}}$	0,7
$\frac{\partial \Delta A_n}{\partial h_0}$	$7 \cdot 10^{-9}$

Погрешность влияния компонентой  $\Delta A_n$  составляет  $m_{\Delta A_n} = 0,002''$ . Вносимая погрешность существенно меньше, чем остальные составляющие погрешности, поэтому в дальнейшем она не учитывалась при расчёте общего бюджета погрешности.

### Погрешность, обусловленная неоднозначностью определения координат смещения мгновенного полюса и астрономических координат места

Погрешность влияния компоненты  $\Delta A_{\text{СП}}$  в соответствии с формулой (4) определяется следующей зависимостью [3]:

$$m_{\Delta A_{\text{СП}}}^2 = \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial x_p} \right)^2 \cdot m_{x_p}^2 + \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial y_p} \right)^2 \cdot m_{y_p}^2 + \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \lambda_z} \right)^2 \cdot m_{\lambda_z}^2 + \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \varphi_z} \right)^2 \cdot m_{\varphi_z}^2, \quad (11)$$

где  $x_p, y_p$  — смещение координат мгновенного полюса;  $\varphi_z, \lambda_z$  — астрономические координаты места ОЭАВ;  $\left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial x_p} \right), \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial y_p} \right), \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \lambda_z} \right), \left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \varphi_z} \right)$  — коэффициенты чувствительности составляющих погрешностей.

Погрешность влияния компоненты  $\Delta A_{\text{СП}}$  составляет  $m_{\Delta A_n} = 0,2''$ . Из результатов, представленных в таблице 3, следует, что вносимая погрешность определения координат смещения мгновенного полюса существенно меньше остальных составляющих погрешностей, поэтому её можно не учитывать. Погрешность астрономических координат места оказывает существенное влияние на общий бюджет погрешности, поэтому её необходимо учитывать с соответствующими коэффициентами влияния.

Таблица 3

Параметры расчёта погрешности вычисления  $\Delta A_{\text{СП}}$

Параметр	Значение
$m_{x_p}$	0,000095"
$m_{y_p}$	0,000079"
$m_{\lambda_z}$	0,5"
$m_{\varphi_z}$	0,3"
$\left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial x_p} \right)$	1,0
$\left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial y_p} \right)$	1,4
$\left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \lambda_z} \right)$	0,3
$\left( \frac{\partial \Delta A_{\text{СП}}}{\partial \varphi_z} \right)$	0,5

### Погрешность, обусловленная влиянием отклонения светового луча окном оптическим

Принцип работы ОЭАВ устроен таким образом, что наблюдения звёздного участка неба происходят из лабораторного помещения через окно оптическое, которое является оптическим элементом и как любой оптический элемент вносит определённую погрешность в измерения астрономического азимута [10] (рис. 8).



Рис. 8. Внешний вид окна оптического

Эта погрешность выражается отклонением светового луча при прохождении оптического элемента [2]. В данном случае эти значения известны и паспортизированы в документации на изделие и составляют не более 0,4" для сагиттальной и меридиональной плоскостей.

Данная погрешность при измерениях азимута на снимке оцифрованного кадра звёздного неба присутствует в виде астигматизма, т.е. представляет не идеальное изображение звезды, а некую расплывчатую поверхность случайного характера присутствия.

В связи с тем, что при вычислении азимута используется множество звёзд, то погрешность, вызванная отклонением светового луча окном оптическим, уменьшается в  $\sqrt{n}$  раз, где  $n = 20$  (среднее количество наблюдаемых звёзд).

Коэффициент чувствительности вычисляется по формуле:

$$c_{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad (12)$$

Погрешность, обусловленная влиянием отклонения светового луча окном оптическим, составляет  $c_{\gamma} = 0,2$ .

### Погрешность калибровки взаимного положения граней БЗП и ОХАН

Азимут ОХАН определяется при передаче азимута визирной оси на внутреннюю зеркальную грань контрольного элемента БЗП. Таким образом, погрешность азимута ОХАН зависит от погрешности калибровки взаимного положения граней контрольного элемента БЗП при измерении угла  $\theta$  — угла отклонения вектора  $\bar{X}_{ГР}$ , относительно плоскости вертикальной плоскости, включающей вектор  $\bar{X}_{КЭ}$  (рис. 9а) и значений угловых геометрических параметров ОХАН (рис. 9б) [10].

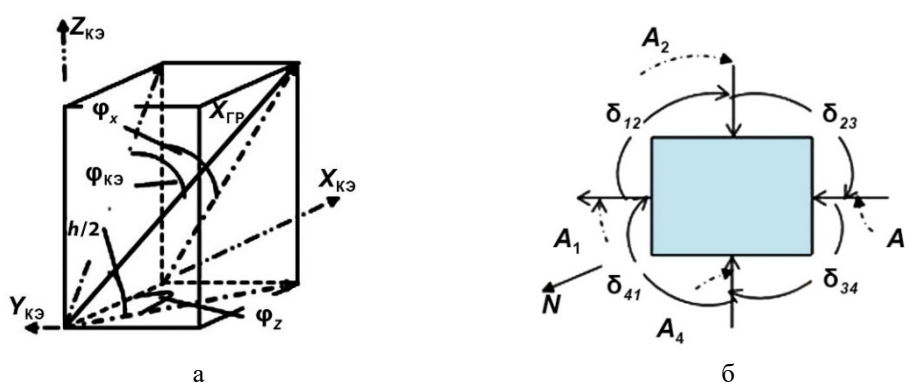


Рис. 9. Схема углов между гранями БЗП и ОХАН: а — схема контрольного элемента БЗП; б — схема взаимного положения граней призмы ОХАН

В соответствии с алгоритмами косвенного измерения азимута по ГОСТ 8.381-2009 [4] составляющие границ НСП определяются по следующим формулам:

$$\theta_{\varphi x}^{\text{БЗП}} = \pm c_{\varphi x} \theta_{\varphi x}, \quad (13)$$

$$\theta_{\varphi z}^{\text{БЗП}} = \pm c_{\varphi z} \theta_{\varphi z}, \quad (14)$$

$$\theta_{\epsilon} = \pm (c_{\varphi x} \theta_{\varphi x} + c_{\varphi z} \theta_{\varphi z} + \theta_{\delta}^{\text{нр}}), \quad (15)$$

где  $c_{\varphi x}$  — коэффициент влияния положения наклонной грани контрольного элемента в части её разворота относительно оси  $X_{КЭ}$  (угол  $\varphi_x$ ) на дополнительную величину астрономического азимута, который определяется выражением:

$$c_{\varphi x} = 2(\cos h \cos \varphi \sin \varphi_y \cos \varphi_y + 2 \sin h \sin^2 \varphi_y), \quad (16)$$

$c_{\varphi z}$  — коэффициент влияния положения наклонной грани контрольного элемента в части её разворота относительно оси  $Z_{КЭ}$  (угол  $\varphi_z$ ) на дополнительную величину астрономического азимута определяется выражением:

$$c_{\varphi z} = 2(\cos h \cos \varphi \cos^2 \varphi_y + \sin h \sin \varphi_y \cos \varphi_y). \quad (17)$$

Вычисленные значения коэффициентов влияния по формулам (14) и (15) в зависимости от широты места представлены в таблице 4.

Таблица 4

Значения составляющих погрешностей НСП определения азимута

Параметры	$\theta_{\varphi x}^{\text{БЗП}}$	$\theta_{\varphi z}^{\text{БЗП}}$	$\theta_{\delta}^{\text{пр}}$	$c_{\varphi x}$	$c_{\varphi z}$
Значения	0,11"	0,11"	0,10"	1,0	1,6

### Результаты исследования

В таблице 5 представлены бюджет неисключённой систематической погрешности и коэффициенты чувствительности, оказывающие наибольшее влияние на результат измерений астрономического азимута.

Таблица 5

Вычисленные значения составляющих погрешности и коэффициентов их чувствительности

№	НСП		Коэффициент чувствительности	
1	$\theta_E$	0,1"	$c_E$	0,2
2	$\theta_{i_{UTC}}$	0,02"	$c_{i_{UTC}}$	1
3	$\theta_{\varphi_z}$	0,3"	$c_{\varphi_z}$	0,5
4	$\theta_{\lambda_z}$	0,5"	$c_{\lambda_z}$	0,3
5	$\theta_y$	0,4"	$c_y$	0,2
6	$\theta_{f_x^{\text{БЗП}}}$	0,11"	$c_{f_x^{\text{БЗП}}}$	1
7	$\theta_{f_y^{\text{БЗП}}}$	0,11"	$c_{f_y^{\text{БЗП}}}$	1,6
8	$\theta_{r_{\text{ОХАН}}}$	0,10"	$c_{r_{\text{ОХАН}}}$	1

В соответствии с ГОСТ 8.381-2009 [4] неисключённая систематическая погрешность измерения астрономического азимута ГПСЭ КМ по разработанной модели погрешности измерений имеет вид [4–6]:

$$\theta_K = 1,4 \cdot \sqrt{c_E^2 \cdot \theta_E^2 + c_{i_{UTC}}^2 \cdot \theta_{i_{UTC}}^2 + c_y^2 \cdot \theta_y^2 + c_{\varphi_z}^2 \cdot \theta_{\varphi_z}^2 + c_{\lambda_z}^2 \cdot \theta_{\lambda_z}^2 + c_{\varphi x}^2 \cdot (\theta_{\varphi x}^{\text{БЗП}})^2 + c_{\varphi z}^2 \cdot (\theta_{\varphi z}^{\text{БЗП}})^2 + c_{\delta}^2 \cdot (\theta_{\delta}^{\text{пр}})^2}. \quad (18)$$

С учётом значений погрешностей и соответствующих коэффициентов чувствительности из таблицы 5, неисключённая систематическая погрешность ГПСЭК в части измерений астрономического азимута составляет не более  $\theta_K = 0,45''$ .

### Выводы

В результате проделанной работы было достигнуто следующее:

- неисключённая систематическая погрешность измерений астрономического азимута направления эталоном составляет 0,45";
- на сегодняшний день продолжается работа по исследованию метрологических характеристик ГПСЭ КМ в части погрешности хранения астрономического азимута оптическим хранителем азимутальных направлений. Для проведения таких исследований требуются наблюдения в течение 3–5 лет и более.

### Литература

1. Березин В.Б., Березин В.В., Цыпулин А.К., Соколов А.В. Адаптивное считывание изображения в астрономической системе на матричном приборе с зарядовой связью // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. — 2004. — Т. 4. — С. 36–45.
2. Вшивкова О.В. Физика Земли и атмосферы. Влияние атмосферы на результаты геодезических измерений: учебное пособие. — М.: МИИГАиК, 2017. — 88 с.
3. Гиенко Е.Г. Астрометрия и геодезическая астрономия: учебное пособие. — Новосибирск: СГГА, 2010. — 142 с.
4. ГОСТ 8.381-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения точности.
5. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.
6. Дойников А.С. Лекции по метрологии. — Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2018. — 292 с.
7. Ковалевский Ж. Современная астрометрия / пер. со 2-го англ. изд. под ред. В.Е. Жарова. — Фрязино: Век 2, 2004. — 480 с. ISBN 5-85099-147-6.
8. Курманбек уулу Талантбек. Обнаружение и определение координат движущихся точечных объектов в последовательности изображений. — Новосибирск. 2009. — 110 с.
9. Махаев, А.Ю., Беркович С.Б., Котов Н.И., Чернышев С.Е. Проблемные вопросы метрологического обеспечения испытаний и эксплуатации автоматической системы определения астрономического азимута // Материалы девятой Всероссийской научно-технической конференции Метрологическое обеспечение обороны и безопасности в Российской Федерации. Пос. Поведники Московской обл. 23–25 октября. — 2012. — С. 92–95.
10. Махаев А.Ю., Беркович С.Б., Котов Н.И., Гайворонский С.В., Садеков Р.Н., Цодокова В.В. Автоматическая система определения астрономического азимута // Метрология: ежеквартальное приложение к научно-техническому журналу «Измерительная техника» — М.: Стандартинформ, 2015. — № 6. — С. 11–20.

11. Тарасов С.М. Исследование влияния инструментальной погрешности автоматизированного астроуниверсала в задаче определения азимута наземного ориентирования // *Гироскопия и навигация*. — 2021. — Т. 29. — № 2. — С. 97–109.
12. Уралов С.С. Курс геодезической астрономии: учебник для вузов. — М.: Недра, 1980. — 592 с.
13. Ханзадян М.А. Стационарный комплекс средств метрологического обеспечения средств измерений азимута // Сборник материалов IV Всероссийской научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Производство и образование». — 2021. — С. 136–142.
14. Ханзадян М.А., Мазуркевич А.В. Разработка методики измерений астрономического азимута с помощью электронного тахеометра // *Альманах современной метрологии*. — 2021. — № 4 (28). — С. 206–215.
15. Федеральный закон от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».

*Статья поступила в редакцию: 03.11.2022 г.*

*Статья прошла рецензирование: 28.10.2022 г.*

*Статья принята в работу: 07.11.2022 г.*