

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФГУП «ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ И РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ»



НОВАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ

Докладчик: Мурзабеков Мурат
М.н.с. ФГУП «ВНИИФТРИ»



Актуальность исследований

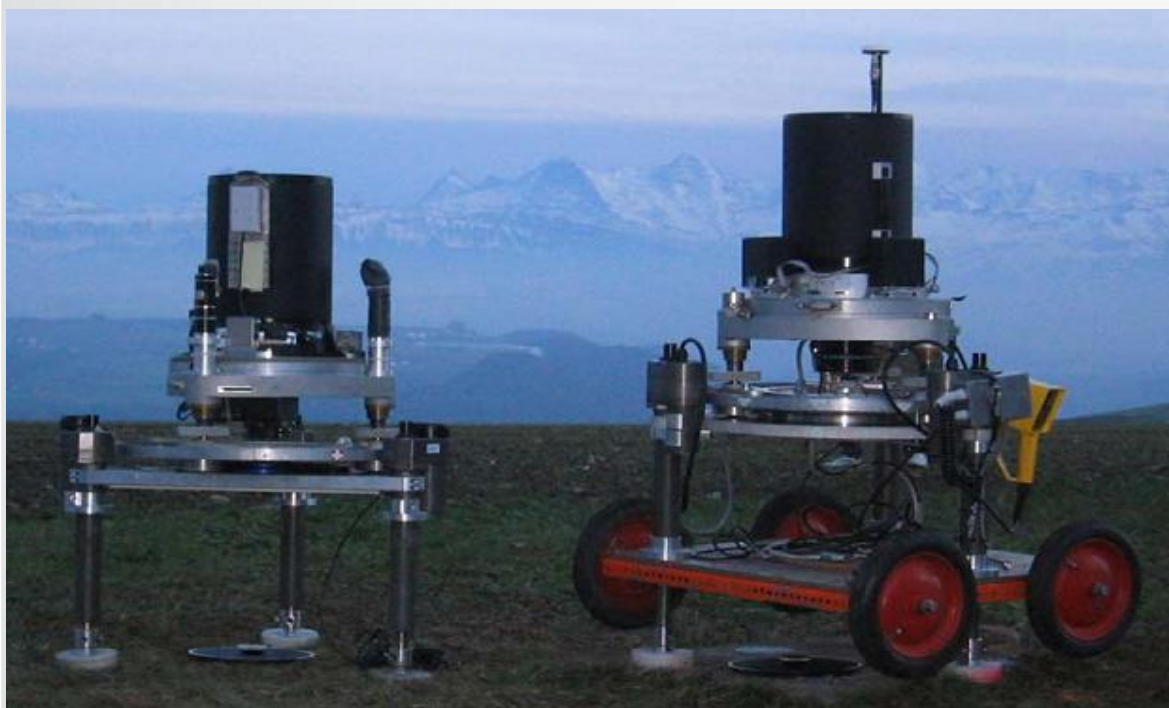
Измерения уклонения отвесной линии (УОЛ) актуальны при решении задач навигации, уточнении параметров ГПЗ, а также при повышении точности решения классических геодезических задач.

Среди основных методов определения УОЛ, в настоящее время используются следующие:

- Гравиметрический метод.
- Метод, основанный на сочетании ГНСС-измерений и геодезических измерений.
- Спутниковый дифференциальный метод, основанный на проведении ГНСС-измерений и наземного нивелирования.
- Метод использования глобальных моделей ГПЗ.

Главным недостатком существующих методов является низкая оперативность (несколько десятков часов измерений для одной точки) и недостаточная точность (погрешность ≥ 1 угл. сек.).

Некоторые известные реализации АУОЛ



АУОЛ	TZK2-D	DIADEM	DZCS	АКОЛ
Разработчик	Университет Ганновера, Германия	Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Швейцария	Университет Босфора, Турция	АО «Концерн «ЦНИИ Электроприбор»
Погрешность	0,1"	0,1-0,2"	0,25"	0,3"

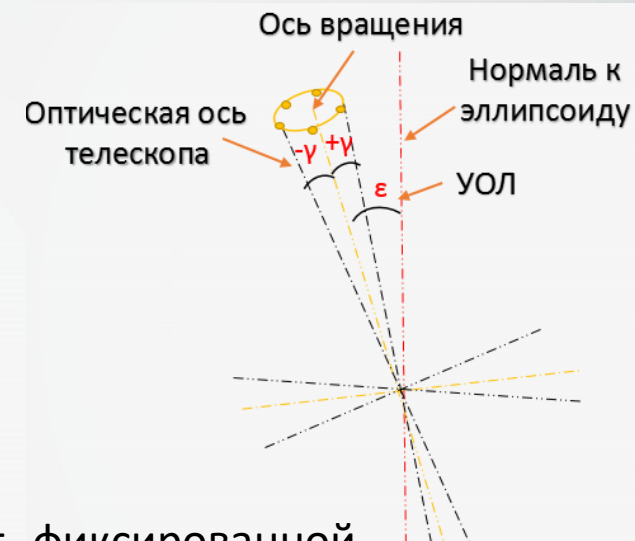
Традиционная методика измерений УОЛ

$$\Phi = \Phi_D^{I+II} + \delta\Phi_n^{I+II} + \delta\Phi_p, \quad \Lambda = \Lambda_D^{I+II} + \delta\Lambda_n^{I+II} + \delta\Lambda_p,$$

где Φ, Λ - итоговые астрономические координаты отвесной линии;

 $\Phi_D^{I+II}, \Lambda_D^{I+II}$ - осредненные астрономические координаты в двух положениях; $\delta\Phi_n^{I+II}, \delta\Lambda_n^{I+II}$ - поправки за наклон осредненные в двух положениях (эти члены

также содержат калибровочные параметры);

 $\delta\Phi_p, \delta\Lambda_p$ - поправки за движение полюса.

Традиционная методика предполагает вращение системы вокруг фиксированной вертикальной оси в двух противоположных положениях (0 – 180 градусов) для устранения смещения показаний инклинометра и осреднение полученных данных

Условия применения

- поворот системы должен осуществляться вокруг фиксированной вертикальной оси;
- поворот системы должен осуществляться ровно на 180 градусов.

Недостатки методики:

1. Необходимо выполнение процесса калибровки (определение калибровочных параметров) перед измерениями.
2. Зависимость калибровочных параметров от времени, что требует их дополнительных исследований.

Макет астроизмерителя разработки ФГУП «ВНИИФТРИ»



Предлагаемая методика измерений УОЛ

$$g_{incl} = M \times R \times A \times g,$$

где g_{incl} – это измерения инклинометра по осям ОХ и ОУ;

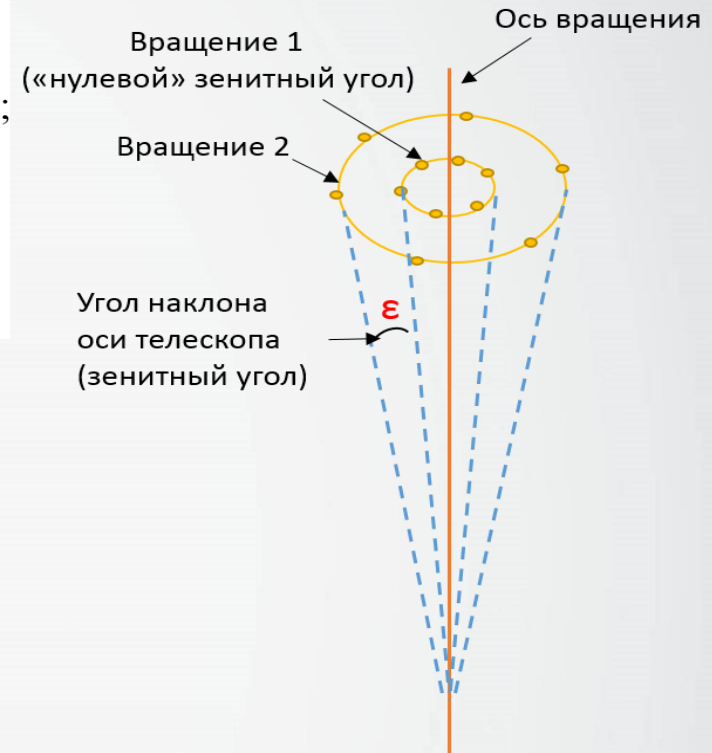
g – направляющий вектор силы тяжести в местной СК (единичной длины);

A – матрица поворота из местной СК в СК сенсора;

R – матрица поворота из СК сенсора в СК датчиков угла наклона;

M – матрица калибровки датчиков угла наклона:

Предложенная методика предполагает вращение системы вокруг вертикальной оси с N количеством шагов ($N \geq 4$) в горизонтальной плоскости с “нулевым” зенитным углом и с зенитным углом равным



Преимущества:

1. В каждой серии происходит оценивание и учет калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит автокалибровка прибора.
2. Отсутствуют требования к точным углам поворота при вращении прибора вокруг оси и выставлению оси вращения.

Алгоритм предлагаемой методики

Измерения выполняются в N (≥ 4) положениях с «нулевым» зенитным углом и зенитным углом установленным пользователем

Этап 1: Сбор данных

Этап 2: Обработка данных

Этап 3: Вычисление УОЛ



Методы определения координат центров звезд

Наименование метода	Определение метода
Метод центра тяжести (МЦТ)	$x_c = \frac{1}{\sum I_i} \sum_{i=1}^n x_i \cdot I_i, \quad y_c = \frac{1}{\sum I_i} \sum_{i=1}^n y_i \cdot I_i,$ где I_i - яркость i-го пикселя; x_i, y_i - координаты i-го пикселя; n – количество пикселей звезды
Метод функции рассеяния точки (аппроксимация звезды функцией Гаусса) (МФРТ)	$E_i = c_0 + c_1 x_i + c_2 y_i + c_3 x_i^2 + c_4 y_i^2,$ где $E_i = \ln I(x_i, y_i) + \ln I(0)$. $x_c = -\frac{c_1}{2c_3}; \quad y_c = -\frac{c_2}{2c_4}.$
Метод аппроксимации формы звезды параболоидом (МАП)	$E_i = c_0 x_i^2 + c_1 y_i^2 + c_2 x_i y_i + c_3 x_i + c_4 y_i + c_5,$ $x_c = \frac{c_2 \cdot c_3 - 2 \cdot c_4 \cdot c_0}{4 \cdot c_1 \cdot c_0 - c_2^2}; \quad y_c = \frac{c_2 \cdot c_5 - 2 \cdot c_3 \cdot c_1}{4 \cdot c_1 \cdot c_0 - c_2^2}.$

Сравнение СКО решения на основе разных методов определения координат центров звезд

УОЛ по широте.

СКО на основе разных методов определения координат звезд



Среднее СКО УОЛ по широте:

МФРТ = 0,21"

МАП = 0,22"

МЦТ = 0,24"

Среднее СКО УОЛ по долготе:

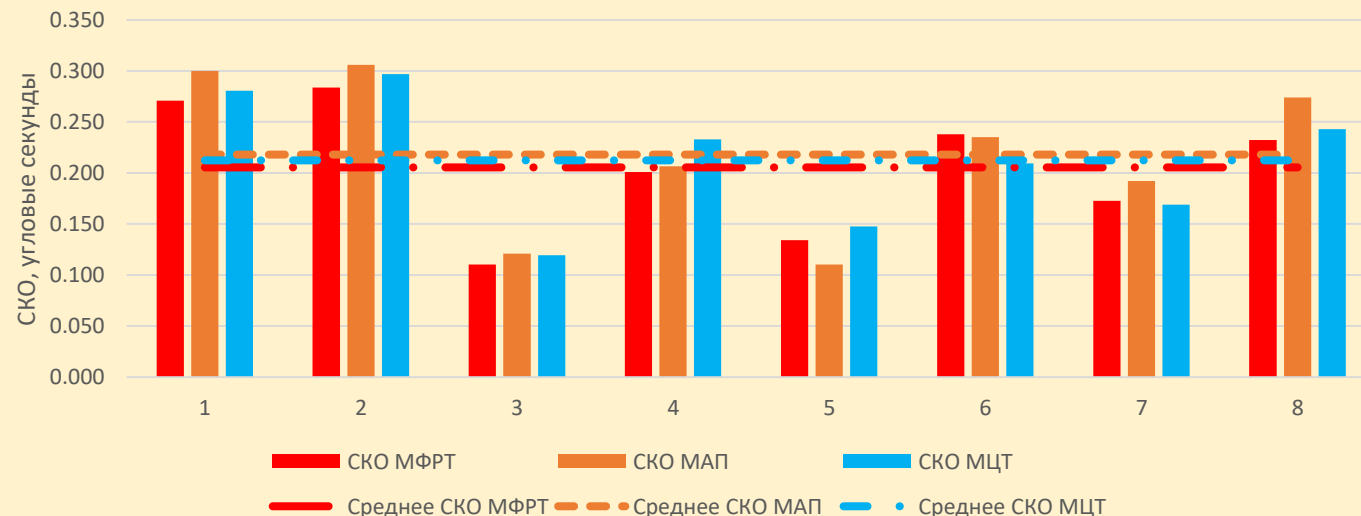
МФРТ = 0,21"

МАП = 0,22"

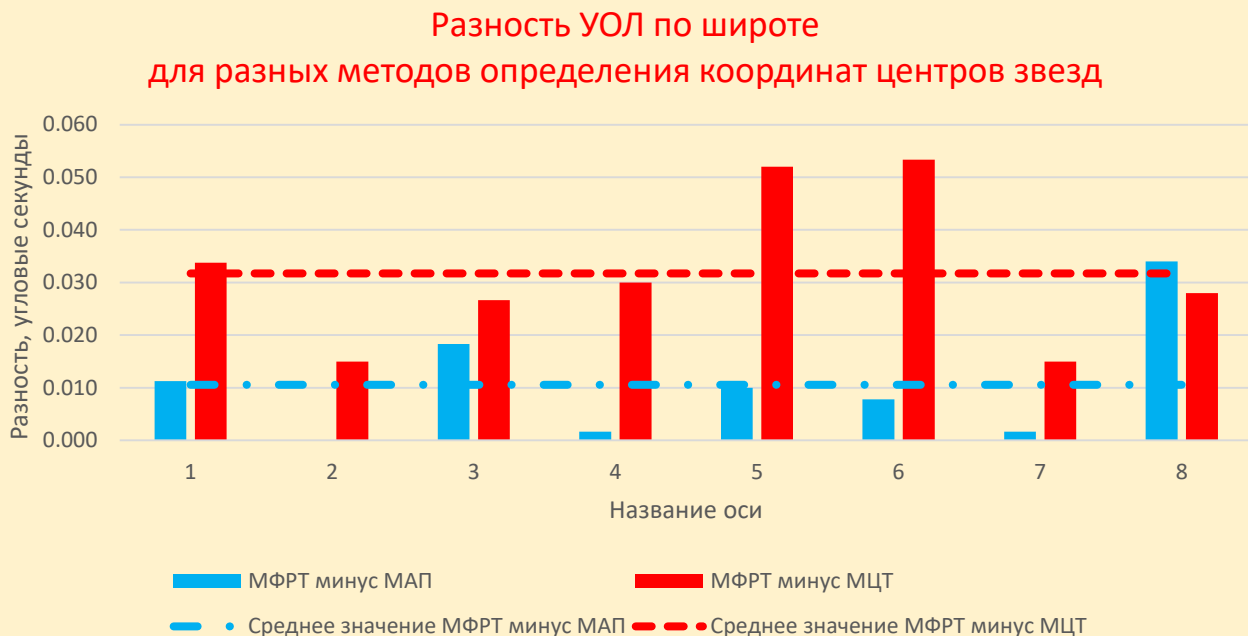
МЦТ = 0,21"

УОЛ по долготе.

СКО на основе разных методов определения координат центров звезд



Сравнение решений на основе разных методов определения координат центров звезд



Разность УОЛ по широте
Средние значения:

МФРТ минус МАП = 0,01"

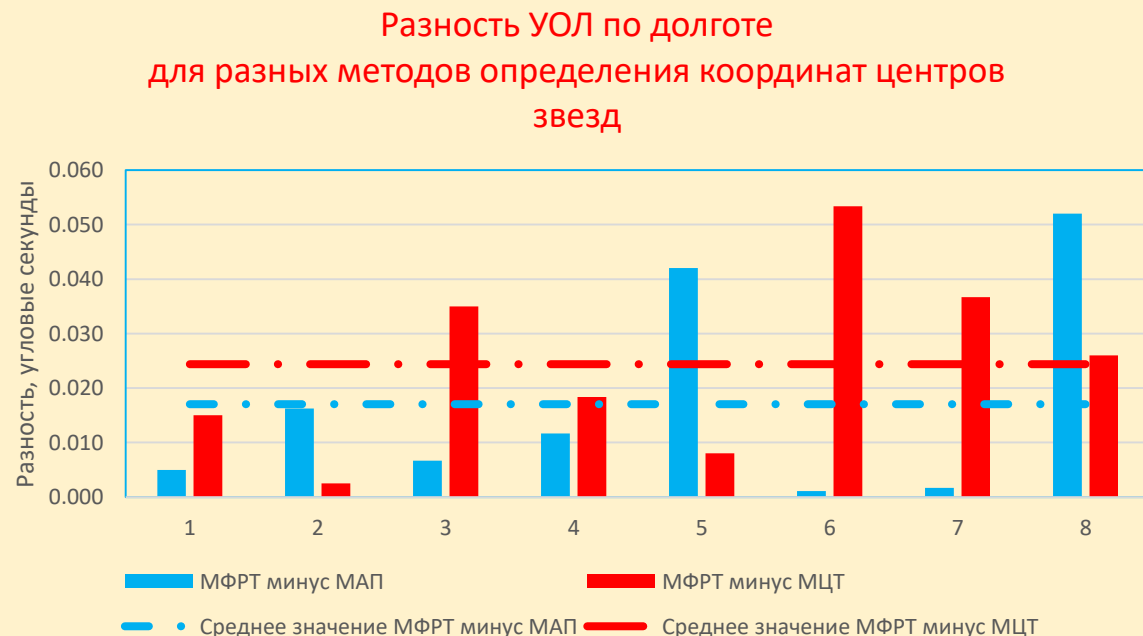
МФРТ минус МЦТ = 0,03"

Разность УОЛ по долготе

Средние значения:

МФРТ минус МАП = 0,02"

МФРТ минус МЦТ = 0,03"



Выделение звезд из каталога и процесс идентификации

1. Определение центра α_0, δ_0 приближенной области:

$$\delta_0 = \varphi; \alpha_0 = \lambda + GAST,$$

где φ, λ - геодезические координаты; GAST – звездное время.

2. Пересчет координат центров звезд в стандартные координаты:

$$\xi = \frac{\operatorname{ctg} \delta \cdot \sin(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}; \eta = \frac{\cos \delta_0 - \operatorname{ctg} \delta \cdot \sin \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}{\sin \delta_0 + \operatorname{ctg} \delta \cdot \cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha - \alpha_0)}.$$

3. Процесс идентификации на основе треугольников:

$$a \geq b \geq c: x_t = \frac{b}{a}, y_t = \frac{c}{a},$$

где a, b, c – стороны треугольников.

$$\left| x_{t_каталог} - x_{t_кадр} \right| \prec \varepsilon; \left| y_{t_каталог} - y_{t_кадр} \right| \prec \varepsilon.$$

Пересчет координат звезд на эпоху наблюдения

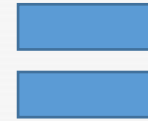
Звездный каталог



Средние
координаты звезд
на эпоху J2000.0



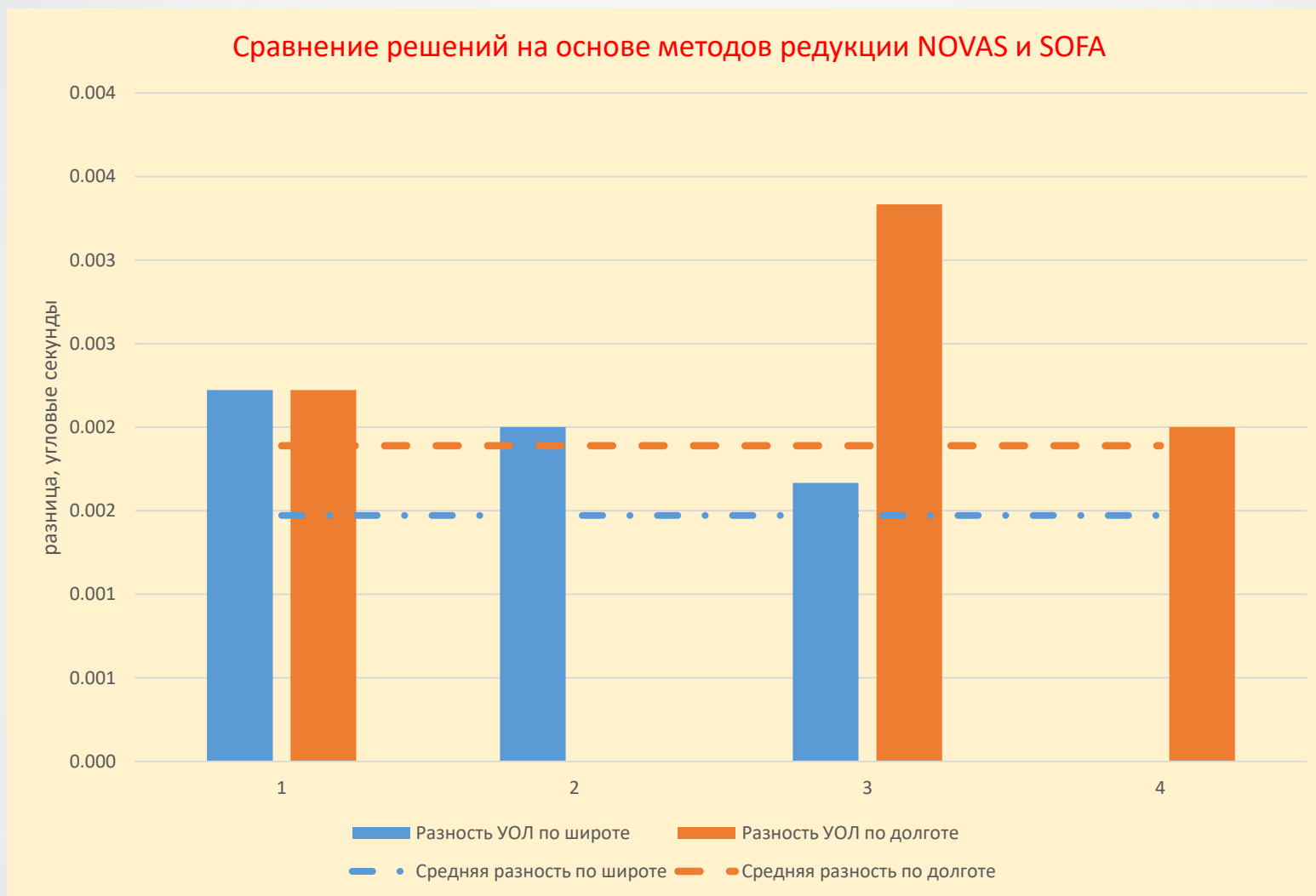
1. Собственные движения
2. Прецессия
3. Нутация
4. Дневная абберация
5. Годовая абберация
6. Гравитационное отклонение света
7. Рефракция



Истинные
координаты звезд
на эпоху наблюдения

NOVAS, SOFA, PinPoint и др.

Сравнение решений на основе библиотек NOVAS и SOFA



Привязка кадра к звездному каталогу

1. В общем случае используется полиномиальное преобразование:

$$\xi = A_{00} + \sum A_{ij} x^i y^j; \quad \eta = B_{00} + \sum B_{ij} x^i y^j,$$

где x, y – пиксельные координаты центров звезд; ξ, η – стандартные координаты; A_{ij}, B_{ij} – коэффициенты преобразований.

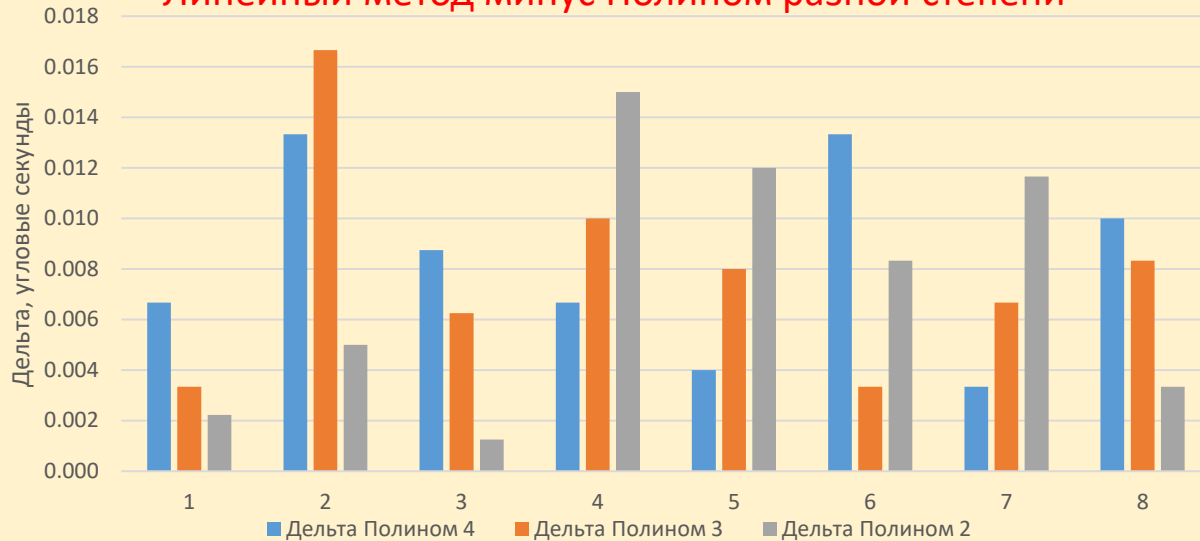
2. В случае отсутствия искажений изображения используется линейное (аффинное) преобразование:

$$\xi = A_0 + A_1 x + A_2 y; \quad \eta = B_0 + B_1 x + B_2 y.$$

Сравнение решений на основе разных методов преобразований

Разность УОЛ по широте

Линейный метод минус Полином разной степени



Разница УОЛ по широте:

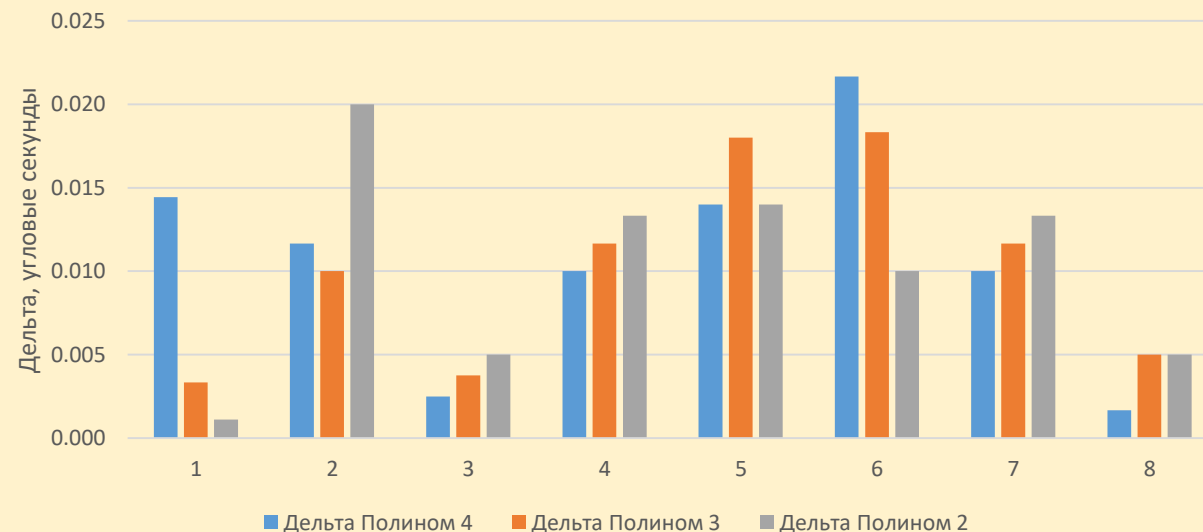
Среднее значение
разницы не более 0,01"

Разница УОЛ по долготе:

Среднее значение
разницы не более 0,01"

Разность УОЛ по долготе

Линейный метод минус Полином разной степени



Звездные каталоги

Наименование характеристики	Значение для звездного каталога		
	Tycho-2	UCAC4	PPMXL
Количество звезд, млн.	2,5	113	900
Звездная величина, m	11,5	16	20
Средняя плотность звезд на квадратный градус	60	2000	15000
Точность координат	0,007" - 0,06"	0,02" - 0,1"	0,08" - 0,3"

Сравнение решений на основе разных звездных каталогов

Разность УОЛ по широте

■ PPMXL минус UCAC4 ■ PPMXL минус TYCHO2



Разность УОЛ по широте

Среднее значение:

PPMXL минус UCAC4 = 0,018"

PPMXL минус TYCHO2 = 0,020"

Разность УОЛ по долготе

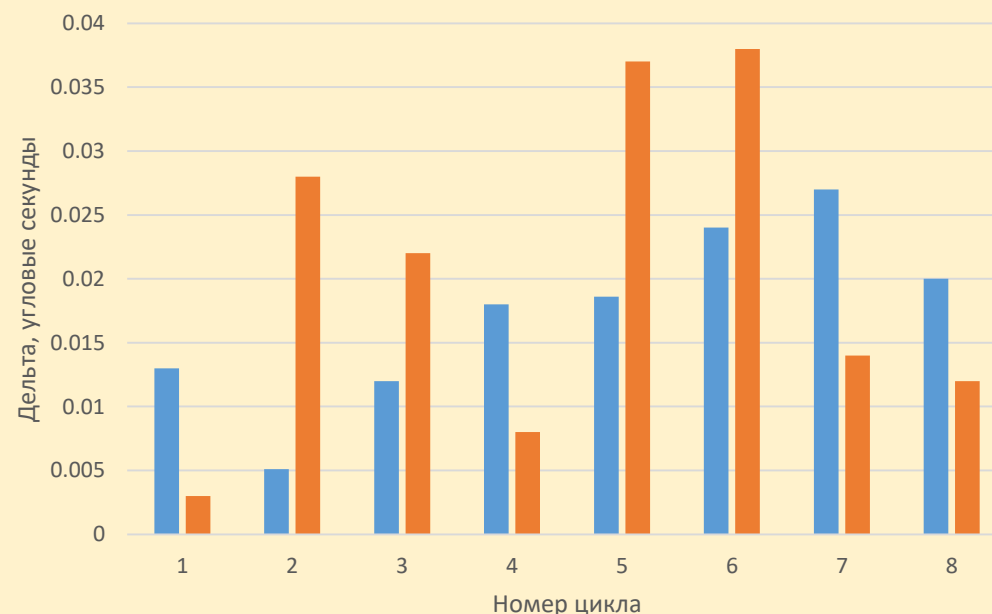
Среднее значение:

PPMXL минус UCAC4 = 0,017"

PPMXL минус TYCHO2 = 0,019"

Разность УОЛ по долготе

■ PPMXL минус UCAC4 ■ PPMXL минус TYCHO2



Оценка параметров модели

Оцениваемые параметры: g_x, g_y - компоненты направляющего вектора силы тяжести; три угла поворота, формирующие матрицу R ; калибровочные параметры инклинометра (матрицы M) m_x, m_y, ε , т.е. оценивается вектор:

$$\overrightarrow{est} = (g_x, g_y, R_x, R_y, R_z, m_x, m_y, \varepsilon).$$

Оценка происходит путем минимизации функции

$$E = \sum_{i=0}^N \left| \left(g_{incl}(\overrightarrow{est}, A_i)_x - incl_x \right)^2 + \left(g_{incl}(\overrightarrow{est}, A_i)_y - incl_y \right)^2 \right|,$$

где $incl_x, incl_y$ - измерения инклинометра, пересчитанные в значения проекции вектора силы тяжести (синусы соответствующих углов наклонов).

Составляющие УОЛ по широте и по долготе есть:

$$\xi = \arcsin(g_x), \quad \eta = \arcsin(-g_y).$$

Результаты испытаний макета АУОЛ

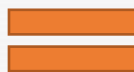
Новая методика выполнения
наблюдений



Метод определения координат центров звезд	МФРТ
Звездный каталог	PPMXL
Пересчет координат звезд на эпоху наблюдения	SOFA
Привязка кадра к каталогу	Полином 4-ой степени



8 звездных ночей в 2017 г. (включая 1 пункт Лапласа
«Вороново»)



СКО определения УОЛ не более 0,3 угл. секунды
Среднее СКО $\approx 0,21 - 0,22$ угл. секунды

Полигон УОЛ высокой дискретности и точности

Рядом с ФГУП «ВНИИФТРИ»

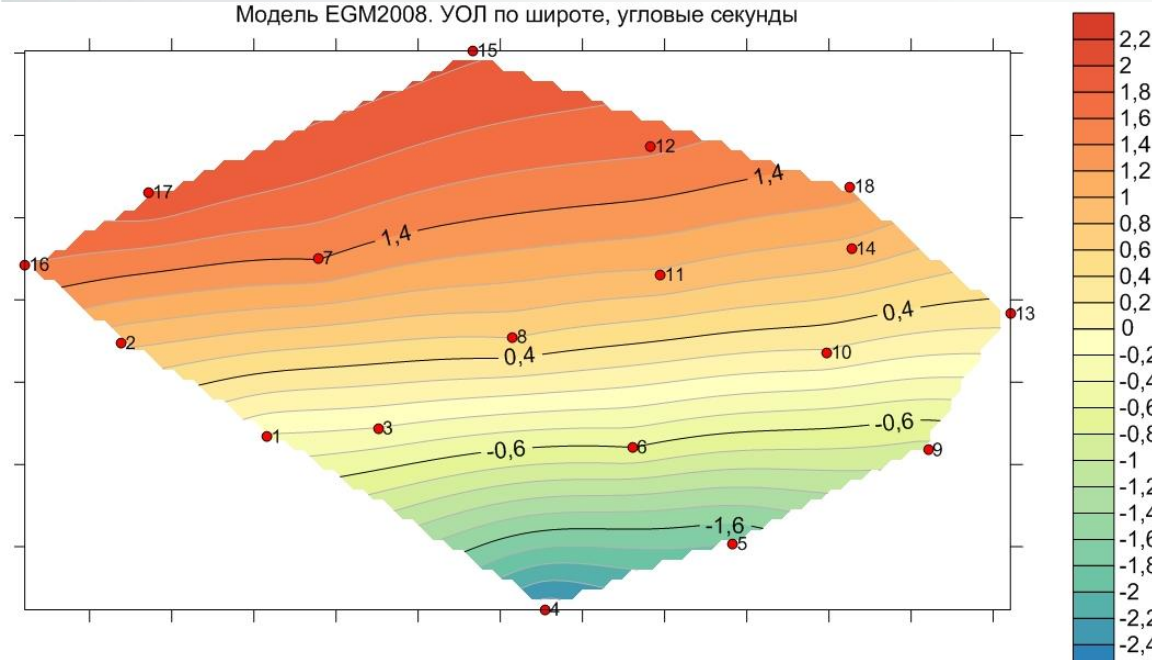
Количество точек: 18

Дискретность: 3-5 км

Размер: 13x11 км

Значение УОЛ для полигона по модели EGM2008

Модель EGM2008. УОЛ по широте, угловые секунды

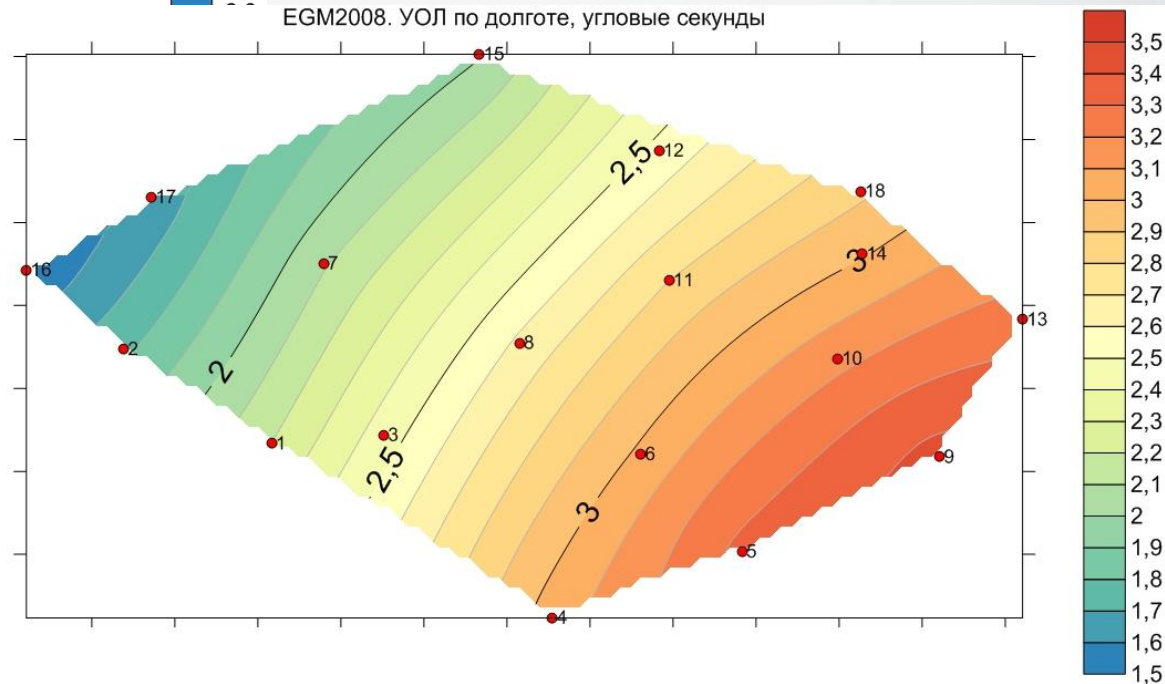


Дискретность точек по модели $\sim 18 - 20$ км

Промежуточные точки определяются
линейной интерполяцией

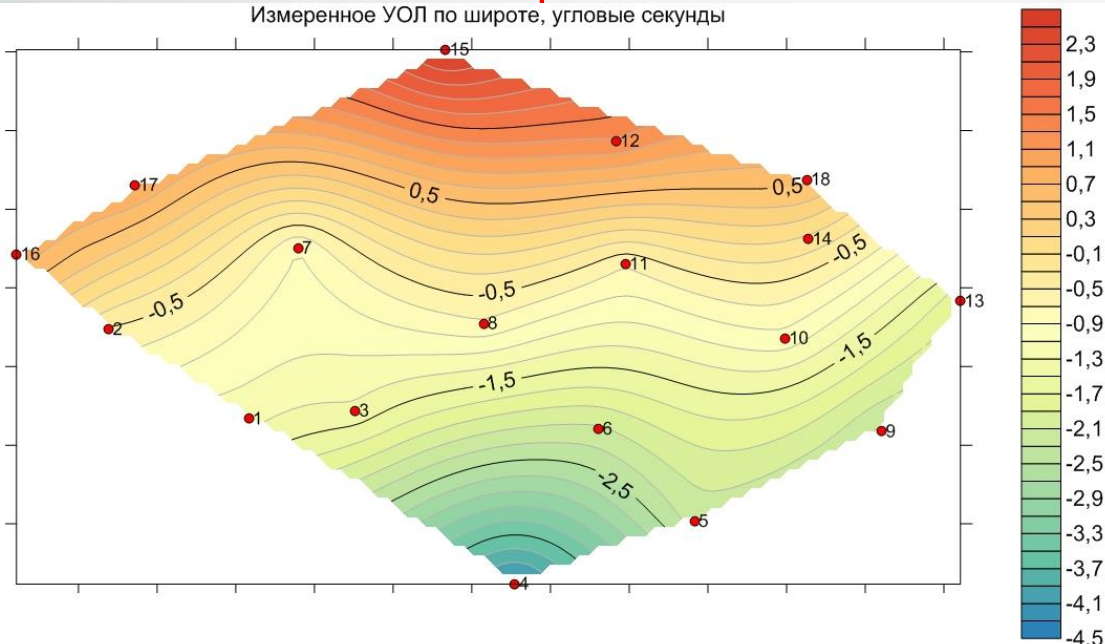
Локальных аномалий
не наблюдается

EGM2008. УОЛ по долготе, угловые секунды



Измеренные значения УОЛ для полигона

Измеренное УОЛ по широте, угловые секунды

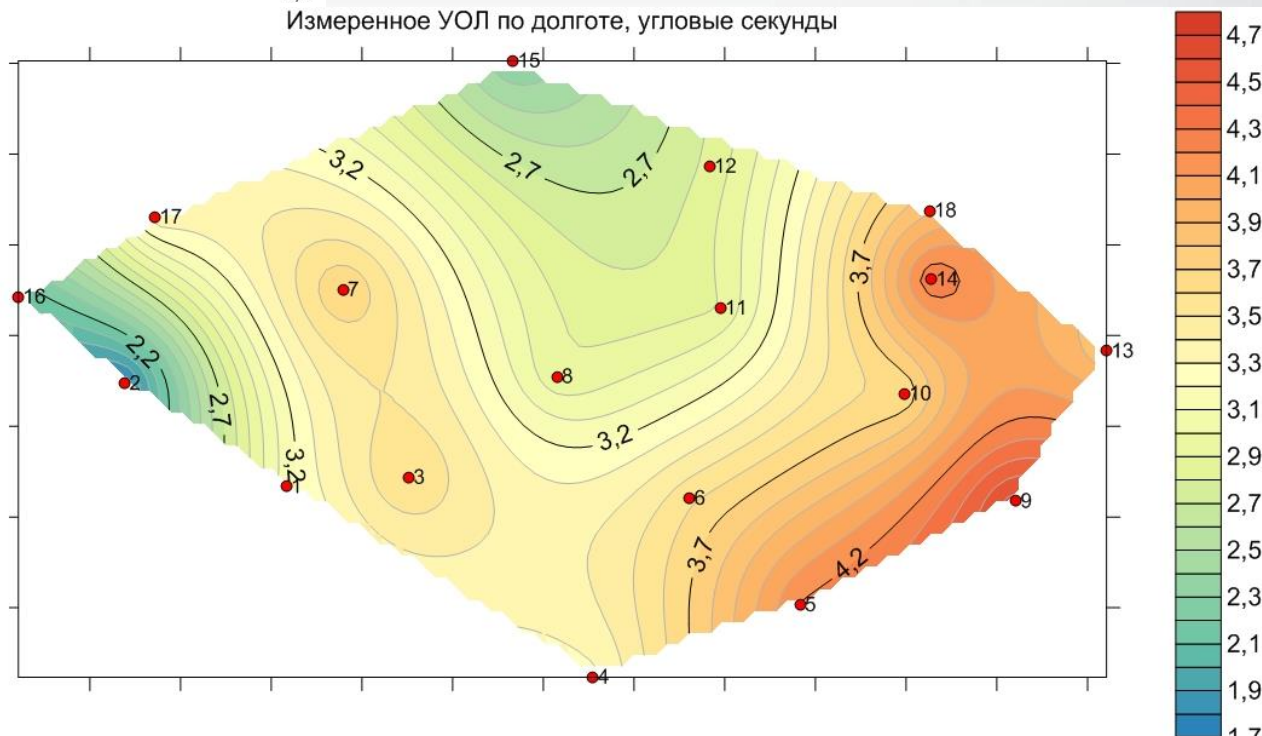


Дискретность измеренных точек $\sim 3 - 5$ км

Наблюдаются локальные аномалии

23.11.2018

Измеренное УОЛ по долготе, угловые секунды



Разность модельных и измеренных значений УОЛ

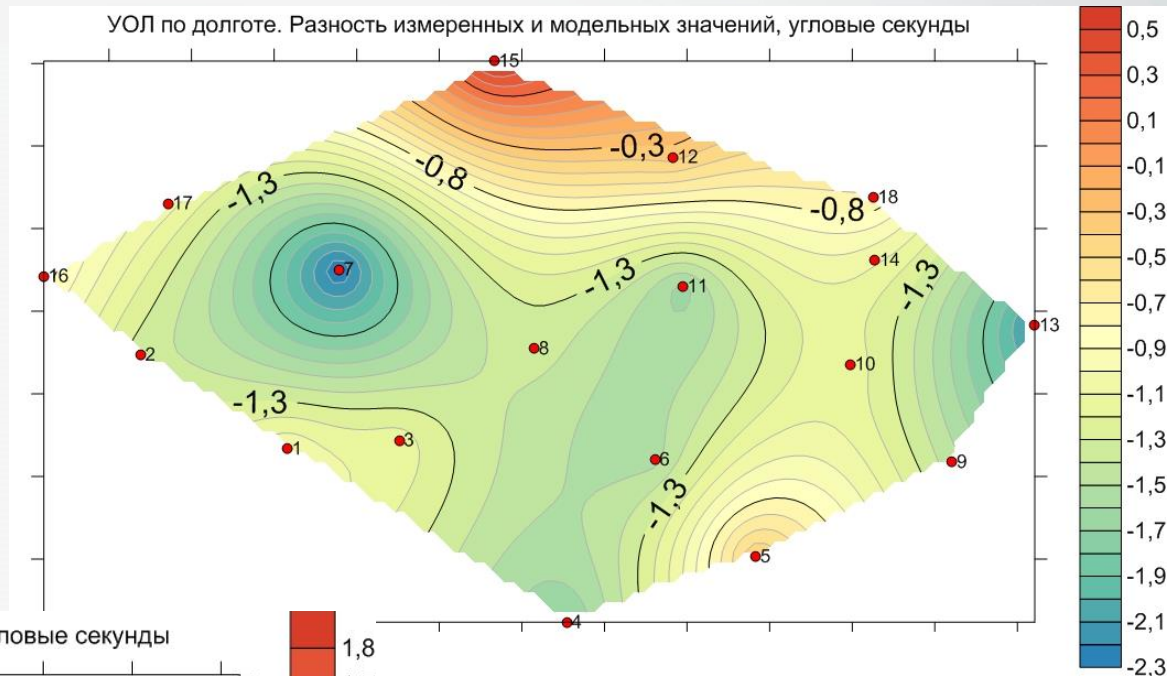
Характеристики обнаруженных
местных аномалий

По широте:

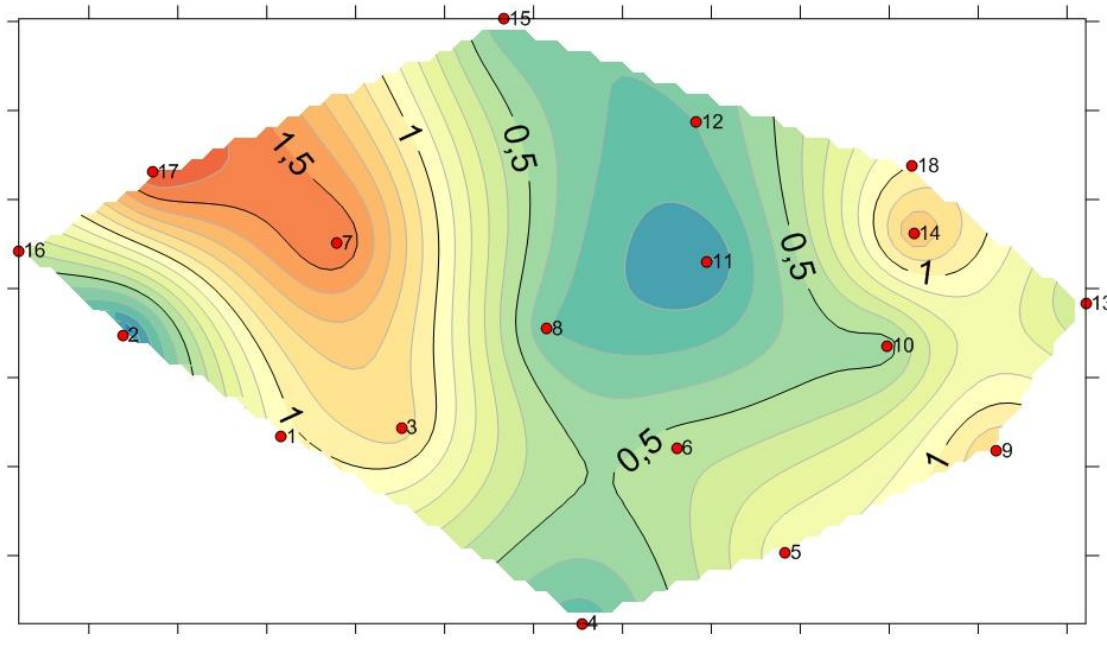
Максимум = 0,57"

Минимум = -2,31"

Среднее = -1,14"



УОЛ по долготе. Разность измеренных и модельных значений, угловые секунды



По долготе:
Максимум = 1,73"
Минимум = -0,06"
Среднее = 0,73"

Астрономический павильон для организации наблюдений, испытаний и сличений АУОЛ



Заключение

1. Создан макет астроизмерителя с погрешностью (СКО) определения уклонов отвесной линии на уровне $0,2''$ - $0,25''$.
2. Разработана новая методика выполнения наблюдений не требующий процедуры калибровки.
3. Создан высокоточный полигон УОЛ дискретностью 3-5 км. Обнаружены аномалии УОЛ, которых нет в модели EGM2008.
4. Создан астрономический павильон для организации сличений астроизмерителей.

Спасибо за внимание!