

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»

На правах рукописи



Мурзабеков Мурат Муштафарович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ
ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ПЕРЕБАЗИРУЕМОГО ЗЕНИТНОГО ТЕЛЕСКОПА

Специальность 05.11.13 «Приборы и методы контроля природной среды, веществ,
материалов и изделий»

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный деятель науки РФ, начальник НТЦ
Фатеев Вячеслав Филиппович

Менделеево 2020

СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ СОЗДАНИЯ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ НАЗЕМНЫХ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЕЙ.....	13
1.1 Основные методы определения уклонений отвесной линии	13
1.2 Известные зарубежные и российские реализации астроизмерителей	17
1.3 Традиционный метод измерений на существующих астроизмерителях ..	25
1.3.1 Описание метода	25
1.3.2 Условия применения традиционного метода	28
1.3.3 Недостатки традиционного метода.....	29
1.4 Принцип действия и основные математические соотношения астрогеодезического метода определения уклонений отвесной линии	29
1.4.1 Шкалы времени, используемые при наблюдениях с астроизмерителями	29
1.4.2 Звездные каталоги.....	30
1.4.3 Алгоритм определения составляющих уклонений отвесной линии .	33
1.5 Выводы по главе 1	41
2. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЕЙ.....	44
2.1 Описание основных источников погрешностей	44
2.2 Погрешность определения Гринвичского звездного времени.....	45
2.3 Погрешность выставления астроизмерителя в горизонтальной плоскости	45
2.4 Погрешность определения геодезических координат местоположения...	46
2.5 Астрометрическая погрешность.....	46
2.5.1 Общие сведения	46
2.5.2 Погрешность звездных каталогов	47
2.5.3 Погрешность определения координат центров звезд	48
2.5.4 Искажения в оптической системе телескопа	49
2.6 Влияние атмосферной рефракции на результаты наблюдений	52
2.6.1 Общие сведения	52
2.6.2 Некоторые теоретические и эмпирические исследования аномальной рефракции	53

2.7	Вариации уклонений отвесной линии	56
2.8	Выводы по главе 2	58
3.	РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ С АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯМИ.....	59
3.1	Введение.....	59
3.2	Определение всех параметров астроизмерителя	60
3.3	Вычисление всех параметров астроизмерителя	62
3.4	Модель предлагаемого метода	65
3.5	Алгоритм, реализующий новый метод измерений.....	68
3.6	Преимущества предложенного метода.....	70
3.7	Условия применения предложенного метода	71
3.8	Операции, выполняемые в соответствии с предложенным методом.....	72
3.8.1	Процесс сбора данных.....	72
3.8.2	Процесс обработки данных.....	73
3.9	Выводы по главе 3	74
4.	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ УОЛ НА АСТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ (МАКЕТЕ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯ).....	75
4.1	Программно-математическая модель астроизмерителя для моделирования разработанного метода	75
4.1.1	Назначение и состав программно-математической модели астроизмерителя	75
4.1.2	Задачи, решаемые программно-математической моделью астроизмерителя	76
4.1.3	Моделирование разработанного метода измерений УОЛ.....	82
4.2	Создание астроизмерительного испытательного стенда на основе действующего макета астроизмерителя уклонений отвесной линии (АУОЛ).....	84
4.2.1	Общие сведения	84
4.2.2	Технические характеристики известных реализаций астроизмерителей.....	84

4.2.3	Телескоп стенда	85
4.2.4	Инклинометр стенда.....	86
4.2.5	ПЗС-камера стенда.....	86
4.2.6	Повышение эффективности астрономических наблюдений при разных климатических условиях	88
4.2.7	Программное обеспечение испытательного стенда.....	89
4.2.8	Внешний вид испытательного стенда на основе макета астроизмерителя АУОЛ.....	90
4.2.9	Исследование расположения инклинометра и способа его закрепления.....	91
4.3	Исследование влияния выбора методов обработки метода измерений на точность значений УОЛ	93
4.3.1	Исследование влияния изменения масштабного коэффициента пикселя на точность измерений УОЛ	93
4.3.2	Исследование влияния выбора метода определения координат центров звезд на точность итоговых значений УОЛ.....	95
4.3.3	Исследование влияния выбора звездного каталога на точность итоговых значений УОЛ.....	97
4.3.4	Исследование влияния выбора метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу на итоговые значения УОЛ.....	100
4.4	Исследование влияний изменений калибровочных коэффициентов астроизмерителя на итоговые значения УОЛ	101
4.5	Испытания разработанного метода повышения точности и оперативности измерения УОЛ на астроизмерительном испытательном стенде	106
4.5.1	Условия испытаний	106
4.5.2	Описание основных географических точек проведения испытаний с астроизмерительным испытательным стендом	108
4.5.3	Итоги испытаний нового метода.....	112
4.6	Подготовка высокодискретной карты ГПЗ на основе разработанного метода и сравнение ее с картой на основе модели ГПЗ	116

4.6.1	Общие сведения	116
4.6.2	Подготовка карты высокой дискретности и точности на основе измерений УОЛ	120
4.6.3	Расчет градиента по измеренным значениям УОЛ	125
4.7	Использование измерений УОЛ при подготовке эталонного маршрута навигации на московской гравитационной аномалии.....	126
4.7.1	Исследования Б.Я. Швейцера	126
4.7.2	Подготовка маршрута навигации с помощью астроизмерителя	127
4.7.3	Сравнение измерений с картой Б.Я. Швейцера	130
4.8	Создание комплекса средств метрологического обеспечения астроизмерителей	131
4.9	Выводы по главе 4	133
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	135
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	141
	Приложение А.....	153

Актуальность темы диссертации

Уклонение отвесной линии (УОЛ) – одно из важнейших понятий в геодезии и гравиметрии, знание которого необходимо для решения задач геодезии, задачи уточнении параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ), а также задач навигации по ГПЗ. УОЛ – это угол между отвесной линией и нормалью к поверхности земного эллипсоида в данной точке.

При решении классических геодезических задач величина УОЛ влияет на измерения зенитных угловых расстояний, вносит погрешность в измерения линейных расстояний, а также в результаты тригонометрического и геометрического нивелирования на поверхности Земли. Кроме того, измерения УОЛ необходимы при гиротеодолитных наблюдениях (для перехода от астрономических азимутов к геодезическим азимутам), а также при переносе значения азимута в шахты. При высокоточных геодезических измерениях погрешность измерения УОЛ должна быть существенно меньше 1".

Исходной информацией для разработки высокостепенных моделей ГПЗ являются результаты спутниковых и наземных измерений. При этом спутниковые измерения несут информацию о длинноволновой структуре ГПЗ. Информацию о коротковолновой структуре ГПЗ возможно получить только на основе данных наземных измерений. Организовав определения УОЛ с дискретностью несколько километров, локальную структуру ГПЗ можно восстановить с максимально высоким разрешением.

Важнейшее из навигационных применений высокоточных измерений УОЛ состоит в снижении погрешности начальной выставки инерциальных навигационных систем. Для некоторых потребителей требуемая погрешность характеризуется значениями в доли угловой секунды.

Другое навигационное применение измерителей УОЛ связано с подготовкой навигационно-гравиметрических карт при создании корреляционно-экстремальных навигационных систем (КЭНС) по ГПЗ. Исходными данными для создания карт в основном являются глобальные модели ГПЗ, которые обладают низкой разрешающей способностью и низкой точностью. В настоящее время

КЭНС используются в качестве ассистирующих (вспомогательных) систем для глобальных навигационных спутниковых систем типа ГЛОНАСС, GPS и др. Их развитию в нескольких странах мира уделяется большое внимание. При этом необходимая погрешность измерения УОЛ вдоль маршрута навигации не должна превышать долей угловой секунды.

Существующие традиционные методы определения УОЛ (гравиметрический, спутниковый дифференциальный) обладают невысокой точностью, характеризующейся погрешностью измерений более 1", а также низкой оперативностью, которая характеризуется продолжительностью измерений в одной точке в несколько десятков часов.

Метод с использованием глобальных моделей геопотенциала обладают низкой точностью (погрешность 1"-3"), а также низким разрешением на поверхности Земли: лучшая на сегодняшний день модель геопотенциала EGM2008 имеет разрешающую способность 18-20 км. Это не позволяет выявить более тонкую структуру распределения УОЛ.

Наиболее точным методом определения УОЛ на сегодняшний день является астрономо-геодезический метод, основанный на сравнении геодезических и астрономических координат местоположения точки измерений с помощью цифрового зенитного телескопа. Это обеспечивает определение УОЛ в сеансах измерений в режиме реального времени. Приборы, использующие этот метод, называются астроизмерителями УОЛ. В существующем методе измерений с астроизмерителем для повышения точности измерений УОЛ телескоп поворачивают вокруг своей оси в горизонтальной плоскости и измерение положения звезд выполняют в двух его противоположных положениях.

Однако такой подход обладает рядом недостатков. Первый из них состоит в необходимости определения калибровочных коэффициентов астроизмерителя перед началом измерений, которые во время измерений в одной точке используются как постоянные величины. Вторым недостатком является необходимость обеспечения точности поворота телескопа в горизонтальной плоскости с погрешностью не хуже 10". Вместе с тем, калибровочные коэффициенты изменяются между се-

риями измерений, выполняемых в одной точке, что вносит дополнительную погрешность в результаты измерений. Кроме того, разворот телескопа на 180° в горизонтальной плоскости с высокой точностью требует наличия высокоточных датчиков поворота. В-третьих, горизонтальная плоскость, на которой установлен астроизмеритель, должна быть неподвижной во время измерений. Это выполнимо только при использовании специального жесткого основания (бетонного, металлического и др.). В связи с этим, возникает **актуальная задача**, заключающаяся в разработке нового метода измерений с астроизмерителем.

Целью работы является повышение точности, оперативности и производительности измерения УОЛ с помощью астроизмерителя.

Главная задача исследований: Разработка и исследование нового метода измерений УОЛ с помощью астроизмерителя, позволяющий учитывать изменение калибровочных коэффициентов между сериями измерений.

Частные научные задачи, поставленные и решённые в работе:

1) Обзор известных методов измерений УОЛ с анализом основных источников погрешностей и метода измерений известных конструкций астроизмерителей УОЛ.

2) Разработка программно-математической модели астроизмерителя для отладки алгоритмов нового метода измерений в лабораторных условиях.

3) Разработка астроизмерительного испытательного стенда на основе макета астроизмерителя для испытания нового метода измерений УОЛ в условиях реального звездного неба.

4) Оценка точности разработанного метода измерений УОЛ на астроизмерительном испытательном стенде в полевых условиях.

5) Создание высокодискретной карты УОЛ и маршрута навигации с испытательным стендом на основе нового метода и сравнение с модельными значениями УОЛ.

Объектом исследований является метод измерений УОЛ с помощью астроизмерителя.

Предметом исследования являются способы повышения точности и оперативности измерений УОЛ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Разработан новый метод измерений УОЛ с помощью астроизмерителя, обеспечивающий возможность «автокалибровки» параметров прибора в течение сеанса измерений в каждой серии. Предложенный метод измерений не требует устройства специального жесткого измерительного бетонного основания и высокоточного измерения угла поворота телескопа в горизонтальной плоскости.

2) Разработана программно-математическая модель нового метода измерений УОЛ и астроизмерительный испытательный стенд.

3) Проведены испытания предложенного метода измерений на астроизмерительном испытательном стенде в полевых условиях. Испытания показали:

- время проведения измерений в точке сократилось с 1,5 ч до 30 минут;
- среднее квадратическое отклонение измерений снизилось с 0,3" до 0,2";
- производительность измерений увеличена в два раза – до 5-8 точек за ночь.

4) При подготовке высокодискретной карты ГПЗ и маршрута навигации впервые обнаружены существенные локальные аномалии УОЛ, которые характеризуют тонкую структуру ГПЗ и в моделях геопотенциала отсутствуют.

Научная новизна исследований:

1) Разработан новый метод измерений УОЛ на цифровом телескопе, который в отличие от традиционного метода, позволяет учитывать изменение калибровочных коэффициентов между сериями измерений за счет свойства «автокалибровки», и, как следствие, обладает более высокой точностью и оперативностью. Он основан на дискретном повороте телескопа и совместной обработке данных измерений с ПЗС-камеры и инклинометра, жестко закрепленного на телескопе. Предлагаемый метод измерений не требует устройства специальных наземных оснований, что расширяет возможность измерений в полевых условиях.

2) Разработана программно-математическая модель астроизмерителя для моделирования нового метода измерений. Данные моделирования использовались для отладки алгоритмов обработки разработанного метода в лабораторных условиях. Это позволило использовать алгоритмы нового метода при непосредственных испытаниях в условиях реального звездного неба.

3) Разработан астроизмерительный испытательный стенд на основе макета астроизмерителя и нового метода измерений.

4) Впервые проведена оценка зависимости точности астроизмерений УОЛ от выбора звездного каталога, метода определения координат центров звезд и метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу. Установлено, что их суммарное влияние не превышает $0,03''$.

5) Использование нового метода и испытательного стенда позволило оперативно и с высокой точностью создать высокодискретную карту ГПЗ и уточнить значения УОЛ при подготовке опорного маршрута навигации на Московской аттракции. Обнаружены ранее неизвестные локальные аномалии УОЛ, что открывает новые возможности для создания высокодискретных навигационных гравиметрических карт.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что предложен новый метод измерений с астроизмерителем, который обеспечивает повышение точности, оперативности и производительности измерений УОЛ.

Практическая значимость исследований заключается в том, что:

1) предложенный метод повышает характеристики перспективных астроизмерителей УОЛ по точности и оперативности;

2) использование разработанного метода с астроизмерительным испытательным стендом позволяет создавать карты УОЛ с дискретностью и точностью, которые существенно выше возможностей самых современных моделей ГПЗ;

3) метод может быть использован для создания высокодискретных опорных маршрутов навигации и уточнения региональной модели ГПЗ;

4) совместные измерения астроизмерителя и высокоточного относительного гравиметра позволят восстановить все компоненты градиента силы тяжести и по-

строить многослойную навигационно-гравиметрическую карту, содержащую слои УОЛ, ускорения свободного падения, а также 5 слоев гравитационных градиентов.

Личный вклад автора. Автор лично разработал новый метод измерений с астроизмерителем и программно-математическую модель измерений, принимал активное участие в создании макета астроизмерителя и лично проводил все измерения с испытательным стендом. Автор лично проводил обработку, принимал активное участие в анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов.

Результаты исследований использовались в пяти научно-исследовательских работах.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на Международном симпозиуме «Метрология времени и пространства» (2014 г. Суздаль, 2016 г. Санкт-Петербург, 2018 г. Менделеево), на научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов «Метрология в XXI веке» (2015 г., 2016 г., 2017 г., 2018 г., 2019 г., 2020 г., Менделеево), на научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК (2015 г., 2018 г., 2019 г., Москва), на научно-технической конференции «Проблемы разработки и внедрения прорывных технологий в интересах создания и применения стратегических ракетных систем» (2016 г., Королев), на научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение» (2017 г., Менделеево), на научно-технической конференции «Современная астрометрия» (2017 г., Москва, ГАИШ МГУ), на круглом столе «Современное состояние и перспективы развития средств топогеодезического и навигационного обеспечения РВСН» научно-деловой программы Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2018» (2018 г., Кубинка), на всероссийской астрометрической конференции «Пулково-2018» (2018 г., Санкт-Петербург, ГАО РАН), на научно-техническом совещании Координационных советов по астрометрии и по гравиметрии ГАИШ МГУ (2019 г., ГАИШ

МГУ), на 44 научно-технической конференции молодых ученых и специалистов «Актуальные задачи военной метрологии» (18 апреля 2019 г. г. Кубинка Московской области), на военно-научной конференции на тему «Пути повышения эффективности топогеодезического и навигационного обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации» (28 июня 2019 г. г. Кубинка Московской области), на V Симпозиуме международной ассоциации по геодезии (IAG) «Наземная, морская и аэрогравиметрия: измерения на неподвижных и подвижных основаниях» (TG-SMM 2019) (01-04 октября 2019 г., г. Санкт-Петербург), на II научно-технической конференции «Навигация по гравитационному и магнитному полям Земли. Новые технологии» (28-31 октября 2019 г., Менделеево).

Материалы диссертации опубликованы в 11 статьях, в том числе в 3 статьях в изданиях из Перечня ВАК российских рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации, и 8 докладах на научно-технических конференциях. Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2018616360.

ВВЕДЕНИЕ

1. ОБЗОР СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВ СОЗДАНИЯ ПЕРЕБАЗИРУЕМЫХ НАЗЕМНЫХ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЕЙ

1.1 Основные методы определения уклонений отвесной линии

Среди основных методов определения УОЛ можно выделить следующие:

1) *Гравиметрический метод* [1 – 4]. Данный метод основан на получении и обработке массивов данных об аномалиях силы тяжести по формулам Венинг-Мейнеса. Метод дает удовлетворительные результаты только для пунктов, расположенных на равнине. УОЛ по этим формулам на равнине характеризуется погрешностью на уровне 0,5", в горах – > 1,0". Чтобы в горах получить такую же точность, как и на равнине, необходимо учесть влияние топографических масс на аномалии силы тяжести по формулам Венинг-Мейнеса.

Главными недостатками метода являются:

- низкая оперативность (несколько десятков часов для одной точки);
- необходимость выполнения детальной гравиметрической съемки на значительной территории специально подготовленными группами операторов гравиметристов и геодезистов.

2) *Спутниковый дифференциальный метод* [2; 5-7]. Метод определения составляющих УОЛ ξ , η на выбранном пункте включает определение при помощи ГНСС-приемников геодезических h_i высот системы пунктов, выбранных вокруг данного пункта, нормальных высот H_i той же системы пунктов, азимутов α_i на эти пункты и расстояний s_i до них от данного пункта при помощи электронного тахеометра с СКО определения углов не более 1" (рисунок 1).

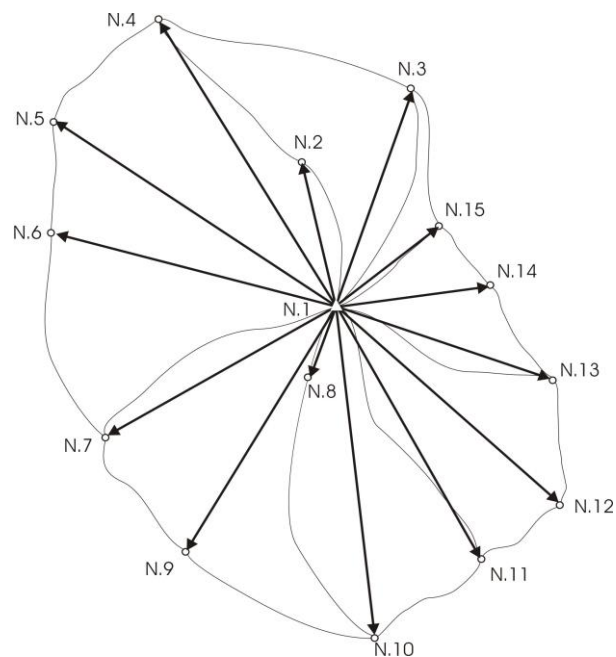


Рисунок 1. К определению УОЛ спутниковым дифференциальным методом

Составляющие УОЛ ξ , η определяются вместе с их СКО при помощи метода наименьших квадратов на основе следующей известной формулы [2]:

$$\frac{\Delta H_i - \Delta h_i}{s_i} = \xi \cos \alpha_i + \eta \sin \alpha_i. \quad (1)$$

Для достижения СКО определения УОЛ не более 1" при СКО определения ΔH_i и Δh_i в 5-10 мм выбранные пункты должны располагаться в радиусе s_i от 5 до 10 км.

Как и в предыдущем методе, главными недостатками метода являются:

- низкая оперативность (несколько десятков часов для одной точки);
- необходимость в специально подготовленных группах геодезистов.

3) *Метод использования глобальных моделей гравитационного поля Земли (ГПЗ)* [8-10]. Данный метод предполагает использование существующих моделей ГПЗ в виде разложения в ряд по сферическим функциям. Модели ГПЗ позволяют восстановить только длинноволновую структуру ГПЗ: лучшая на сегодняшний день модель ГПЗ EGM2008 имеет разрешающую способность 18-20 км. Это не позволяет выявить более тонкую структуру распределения УОЛ.

Исследования, проведенные в работе [9], показывают, что погрешность определения составляющих УОЛ по модели EGM2008 в целом по Земле $\geq 1,5''$.

Однако, исследования по вычислению составляющих УОЛ по модели EGM2008 на локальной территории, выполненные в работе [11], дают погрешность не менее 3".

Главными недостатками метода является:

- низкая точность;
- низкая разрешающая способность (18-20 км).

4) *Метод гравитационной градиентометрии* [12, 13]. Данный метод основан на использовании гравитационного градиентометра, измеряющего все компоненты тензора вторых производных геопотенциала. Для измерения УОЛ с точностью порядка 1" погрешность определения тензора вторых производных геопотенциала должна составлять 1 Этвеш и менее [14].

Недостатком метода является отсутствие гравитационных градиентометров с требуемыми точностными характеристиками.

5) *Астрогеодезический метод определения УОЛ* [1, 2, 15, 16]. Данный метод основан на определении астрономических координат, которые представляют собой компоненты направления отвесной линии в данной точке, и геодезических координат, которые характеризуют направление нормали к поверхности эллипсоида в той же точке. Сравнение астрономических и геодезических координат в точке размещения прибора обеспечивает прямое определение УОЛ в сеансах измерений. Приборы, использующие этот метод, называются астроизмерителями УОЛ (встречаются также и иные названия этих приборов: зенитный телескоп или цифровая зенитная камера).

Основными компонентами астроизмерителя являются: зенитный телескоп, ГНСС-приемник, ПЗС-камера для получения кадров звездного неба, инклинометр для определения фактического наклона телескопа, полевой компьютер и вспомогательное оборудование. ГНСС-приемник определяет геодезические координаты B , L в данной точке и время экспозиции кадра звездного неба в шкале UTC; комбинация телескопа, ПЗС-камеры и инклинометра позволяет определить локальное

направление отвесной линии, выраженное астрономическими координатами Φ , Λ (рисунок 2).

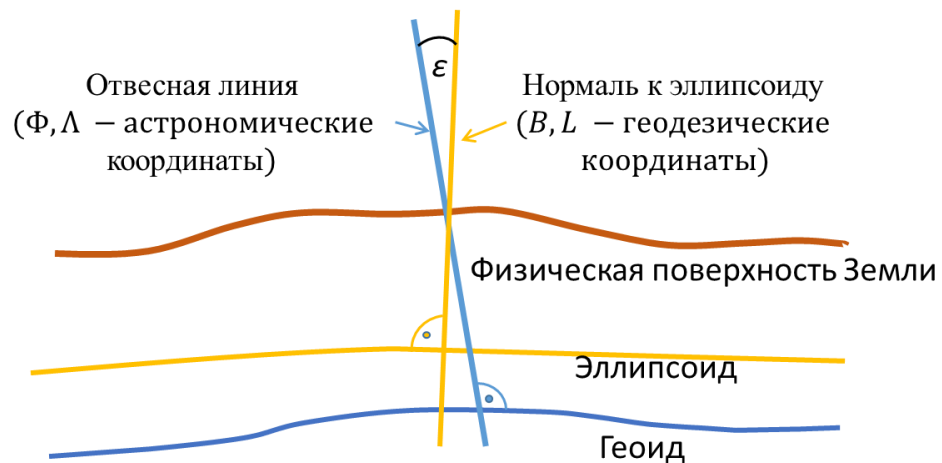


Рисунок 2. Основной принцип определения УОЛ астрогеодезическим методом
Угол между этими двумя направлениями и есть УОЛ (см., например, [15])

$$\varepsilon = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}, \quad (2)$$

$$\xi = \Phi - B, \quad \eta = (\Lambda - L) \cdot \cos B,$$

где ε – полное значение УОЛ;

ξ – составляющая УОЛ по широте;

η – составляющая УОЛ по долготе.

Направление отвесной линии Φ , Λ определяется из наблюдений звезд, чьи экваториальные координаты – прямое восхождение α и склонение δ даны в небесной системе координат (СК) ICRS. Астрономические координаты – долгота Λ и широта Φ определяют пространственное направление отвесной линии относительно земной СК ITRS. Земная СК (ITRS) и небесная СК (ICRS) связаны через гринвичское звездное время (GAST). GAST – часовой угол истинной точки весеннего равноденствия на гринвичском меридиане. Астрогеодезический метод использует эквивалентность астрономических Φ , Λ и экваториальных α , δ координат для звезды, точно находящейся в зените [17-19] (рисунок 3):

$$\Phi = \delta, \quad (3)$$

$$\Lambda = \alpha - GAST.$$

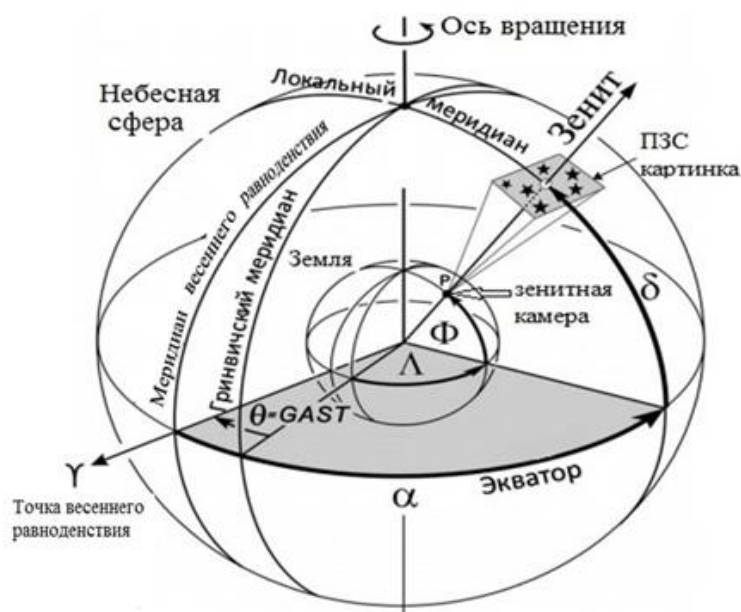


Рисунок 3. К определению УОЛ астрогеодезическим методом

Точность существующих стационарных астроизмерителей (см. раздел 1.2) находится в пределах $0,1''$ - $0,3''$, а точность единичных измерений может доходить до $0,1''$. Астроизмерители получили широкое распространение во многих странах мира в силу высокой оперативности измерений и точности получаемых значений УОЛ. Время измерений в каждой точке составляет до 1,5 ч.

Таким образом, как видно из сравнительного анализа приведенных выше методов определения УОЛ, астрономо-геодезический метод, который реализуется в астроизмерителях, превосходит существующие методы как по точностным характеристикам, так и оперативности.

Рассмотрим более подробно существующие астроизмерители, их метод измерений и основные математические соотношения астрономо-геодезического метода.

1.2 Известные зарубежные и российские реализации астроизмерителей

Первые портативные астроизмерители под названием TZK1 (рисунок 4) и TZK2 были разработаны и использовались в университете Ганновера, начиная с 1970-х гг. Эти приборы достигали точности $0,5''$ [20]. В 1980-х гг. эти приборы представляли собой один из самых экономичных инструментов для астро-

геодезического определения направления отвесной линии. Тем не менее, затрачиваемое время было относительно высоким, так как наблюдения выполнялись визуально, поэтому требовались не только лучшие приборы, но и квалифицированные наблюдатели.

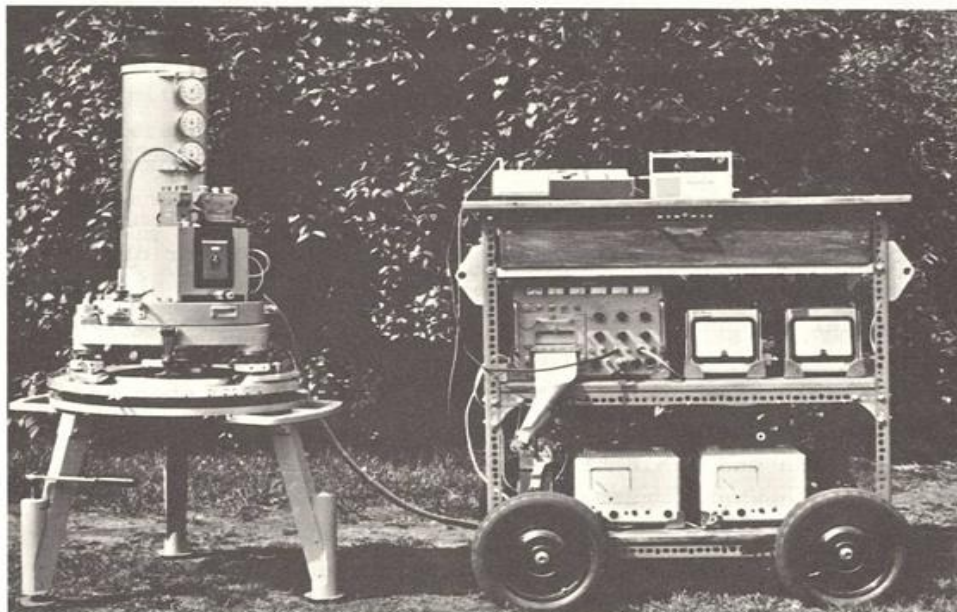


Рисунок 4. Транспортабельная фотографическая камерная система TZK1 университета Ганновера

Изобретение светочувствительных цифровых датчиков изображений на основе ПЗС-сенсоров, которые в состоянии заменить аналоговые приборы и методы фотографирования, в корне изменило наблюдательную астрономию [см., например, 21, 22]. Этими разработками также была затронута геодезическая астрономия. ПЗС-сенсоры, используемые для цифровой обработки изображений звезд, обеспечивают получение данных об изображениях непосредственно после наблюдений, которые необходимы для обработки on-line.

В Институте Геодезии (Institut für Erdmessung (IfE)), университете Ганновера [19, 23] и в Лаборатории Геодезии и Геодинамики (GGL) Швейцарской Высшей Технической Школы Цюриха (ETH Zurich) [24, 25] проводились исследования астрогеодезического применения ПЗС технологий. Существующие астроизмерители были модифицированы путем дооснащения их ПЗС-сенсорами, в результате чего были созданы цифровые астроизмерители (Digital Zenith Camera System - DZCS). Астроизмеритель университета Ганновер называется «транспор-

табельная зенитная камера 2 с цифровой системой съема» (TZK2-D), тогда как астроизмеритель Технической Школы Цюриха называется «цифровая астрономическая измерительная система определения отклонения» (DIADDEM). Результаты, полученные на этапах разработки, оказались весьма успешными и продемонстрировали высокий потенциал автоматизированных астроизмерителей для исследований локального гравитационного поля [26, 27]. Благодаря полностью автоматизированной системе регистрации эта новая экспериментальная модель устранила влияние «человеческого фактора» на точность измерений. Кроме того, они позволили существенно ускорить и упростить процедуру измерений УОЛ (рисунок 5).



Рисунок 5. Внешний вид астроизмерителей: слева - университета Ганновера (TZK2-D); справа - Швейцарской Высшей Технической Школы Цюриха (DIADDEM)

Специальная конструкция астроизмерителей включает подвижную часть, состоящую из телескопа, ПЗС-камеры и инклинометра, которая образует верхнюю часть системы и может поворачиваться на 180° в горизонтальной плоскости. Это позволяет наблюдать звезды в двух противоположных направлениях. Полевой компьютер применяется для контроля устройств и потока данных, их хранения и обработки в режиме реального времени. Источник питания включает несколько 12-вольтовых аккумуляторов, обеспечивающих работу устройства в по-

левых условиях. Приборы являются транспортабельными и полностью автоматизированы на основе цифровой техники.

Технические характеристики обеих приборов даны в таблице 1.

Таблица 1. Технические характеристики астроизмерителей TZK2-D и DIADEM

Наименование характеристики	Значение для астроизмерителя	
	TZK2-D, Ганновер	DIADEM, Цюрих
ПЗС-сенсор	Kodak KAF 1602E	KAF 3603 E
Размер сенсора, пиксель	1530x1020	3072x2048
Размер пикселей, мкм	9	9
Масштаб пикселей	1,86"/пиксель	1,86"/пиксель
Поле зрения	47,2'x31,5'	95,2'x53,5'
Время экспозиции, с	от 0,2 до 0,5	от 0,2 до 0,5
ГНСС-приемник	Z12, Ashtech	μ-bloxAntaris, Leica
Инклинометр	HRTM-1, Lippmann	Zerotronic/HRTM
Диапазон измерений	±600"	±1°/±300"
Средняя звездная величина звезд	12-14	12-14
Звездные каталоги	Tycho-2, UCAC	Tycho-2, UCAC

Астроизмерители TZK2-D и DIADEM использовались при построении Европейской объединенной геодезической сети (European Combined Geodetic Network) и Европейской единой высотной сети (European Unified Vertical Network) [28]. Оба инструмента использовались для определения локальной и региональной модели геоида и гравитационного поля Земли [28-31]. Точность обоих приборов находится на уровне 0,1"-0,2".

В Турции в университете Босфора также разработан астроизмеритель, представленный на рисунке 6 [32]. Данный прибор имеет более простую конструкцию, чем его аналоги TZK2-D и DIADEM, и менее точные составные компоненты. В отличие от TZK2-D и DIADEM средняя звездная величина используемых звезд составляет 10-11. При обработке наблюдений авторы использовали такие программные компоненты, как Novas, PinPoint, Astrometry, SExtractor [33-36]. Достигнутая точность определения УОЛ составляет 0,24". Однако авторы в дальнейшем планируют добиться точности 0,1".



Рисунок 6. Астроизмеритель разработки университета Босфор (Турция)

Технические характеристики астроизмерителя приведены в таблице 2.

Таблица 2. Технические характеристики астроизмерителя разработки университета Босфор (Турция)

Наименование характеристики	Значение
ПЗС-сенсор	Kodak KAF-3200ME
Размер сенсора, пиксель	2184x1510
Размер пикселей, мкм	6,8
Время экспозиции, с	от 0,2 до 0,5
Наклономер	Leica Nivel 210
Диапазон измерений	$\pm 600''$
Звездный каталог	UCAC2/4, GCS
СКО	0,24''

В Латвии в Институте геодезии и геоинформации разработан астроизмеритель, представленный на рисунке 7 [37]. Данный прибор имеет следующие характеристики: 20-см телескоп с фокусным расстоянием 2000 мм; устройство изображения с разрешением 3300x2500 пикселей, с размером пикселей 5,4 мкм и масштабом пикселей 0,56 "/пиксель; поле зрения 0,5°x0,39°. Телескоп стоит на трено-

ге на трех небольших подшипниках и может поворачиваться вокруг вертикальной оси на любой угол с помощью шагового двигателя. Наклономер смонтирован на телескопическом основании. Конструкция предполагает использование технологии беспроводной связи Wi-Fi. Авторы оценивают ожидаемую погрешность определения УОЛ в 0,1".



Рисунок 7. Астроизмеритель разработки Института Геодезии и Геоинформации (Латвия)

В Польше разработан астроизмеритель, представленный на рисунке 8. В его состав входят следующие компоненты [38]:

- телескоп МТО-11СА с фокусным расстоянием 1000 мм и диаметром 100 мм;
- ПЗС-камера StarlightXpress SXVF-M25C с разрешением 3024x2016 пикселей, с размером пикселя 7,8 мкм и масштабом пикселей 1,63 "/пиксель;
- наклономер Wyler Zerotronic с погрешностью 0,1".

Обработка полученных кадров звездного неба проводилась с использованием программного обеспечения PinPoint Astrometric Engine с использованием звездного каталога Tycho-2. Достигнутая точность определения УОЛ составляет несколько угловых секунд.

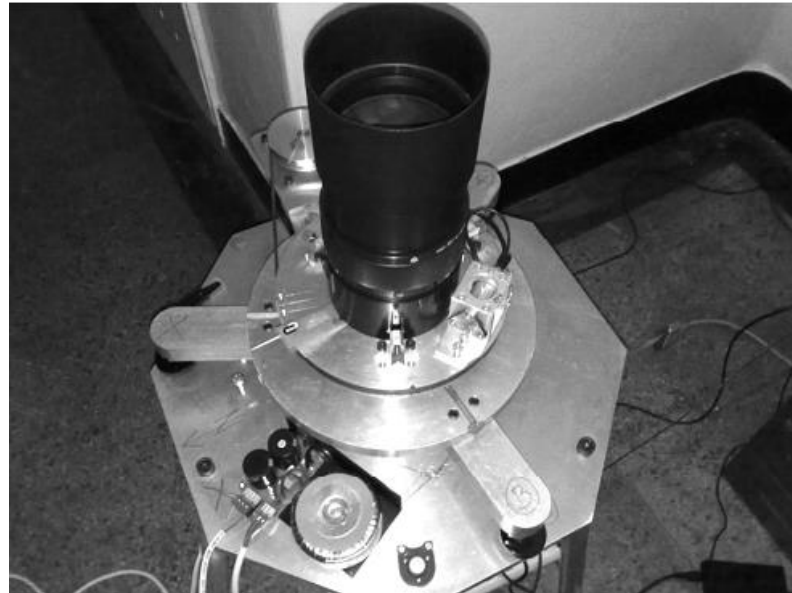


Рисунок 8. Астроизмеритель разработки АГН Университета науки и технологий
(Польша)

В России в АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» создан астроизмеритель, внешний вид которого представлен на рисунке 9 [39, 14]. Характеристики прибора представлены в таблице 3.

Таблица 3. Технические характеристики астроизмерителя ЦНИИ «Электроприбор»

Наименование	Значение
Диаметр телескопа, мм	200
Фокусное расстояние, мм	1218
Формат КМОП-матрицы	5120×3840
Размер пикселя матрицы, мкм	6,4
Позе зрения	1,9°
СКО	0,3"



Рисунок 9. Астроизмеритель разработки АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
В 2014 г. в Китайской национальной астрономической обсерватории разработа-
н астроизмеритель, представленный на рисунке 10 [40].

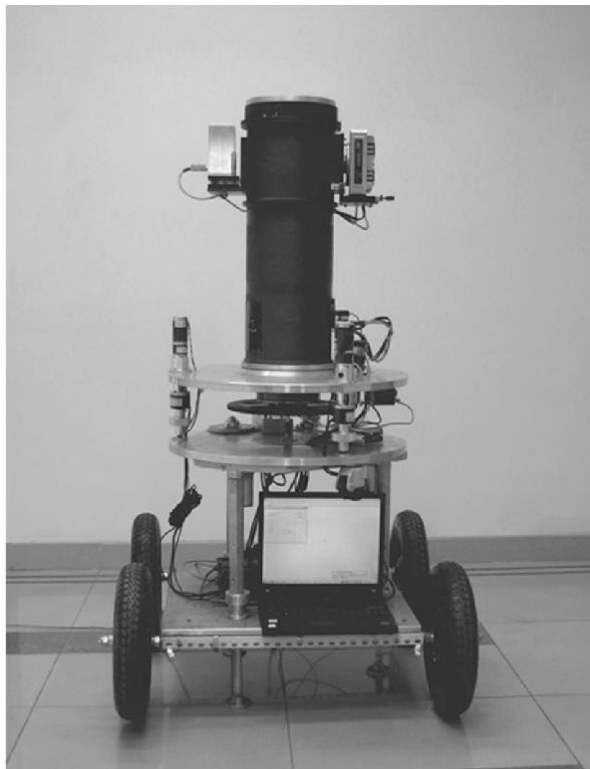


Рисунок 10. Астроизмеритель Китайской национальной астрономической обсер-
ватории

Технические характеристики астроизмерителя представлены в таблице 4.

Таблица 4. Технические характеристики астроизмерителя Китайской национальной астрономической обсерватории

Наименование	Значение
Диаметр телескопа	200 мм
Фокусное расстояние телескопа	1180
Инклинометр	HRTM, Lippman
ПЗС-сенсор	Kodak KAF 6303E
Поле зрения	1°
Время экспозиции	0,5 с
Точность	0,1"-0,2"

1.3 Традиционный метод измерений на существующих астроизмерителях

1.3.1 Описание метода

Метод измерений существующих астроизмерителей (назовем ее традиционным методом) предполагает измерения в двух стационарных противоположных положениях телескопа (I (0°) и II (180°)) в горизонтальной плоскости. Уравнение измерений традиционного метода измерений выглядит следующим образом:

$$\Phi = \Phi_D^{I+II} + \delta\Phi_n^{I+II} + \delta\Phi_p, \quad \Lambda = \Lambda_D^{I+II} + \delta\Lambda_n^{I+II} + \delta\Lambda_p, \quad (4)$$

где Φ, Λ – итоговые астрономические координаты отвесной линии;

$\Phi_D^{I+II}, \Lambda_D^{I+II}$ – осредненные астрономические координаты в двух положениях;

$\delta\Phi_D^{I+II}, \delta\Lambda_D^{I+II}$ – поправки на наклон в двух положениях;

$\delta\Phi_p, \delta\Lambda_p$ – поправки на движение полюса.

Неизвестными параметрами традиционного метода являются [24]:

– ξ, η – составляющие УОЛ по широте и по долготе;

– m_x, m_y, ε – масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра;

– β – угол взаимной ориентации осей инклинометра и ПЗС-камеры;

– k_x, k_y – температурные коэффициенты осей инклинометра.

Следует заметить, что процедура измерений с традиционным методом не подразумевает одновременное оценивание всех параметров и состоит из следующих этапов:

1) Определение температурных коэффициентов k_x, k_y инклинометра в лабораторных условиях. В дальнейшем они учитываются как постоянные величины.

2) Определение параметров инклинометра m_x, m_y, ε и угла взаимной ориентации осей инклинометра и ПЗС-камеры β в условиях реального звездного неба перед началом измерений. В дальнейшем они учитываются как постоянные величины.

3) Проведение наблюдений звездного неба в двух стационарных положениях телескопа, отличающихся на 180° с погрешностью не хуже $10''$ в горизонтальной плоскости.

4) Фиксация (съемка) кадра изображения звездного неба в каждом из двух положений телескопа.

5) Определение пиксельных координат звезд x, y в каждом кадре из двух положений телескопа. Затем выполняют идентификацию звезд из изображения с использованием звездного каталога и определяют параметры преобразований между пиксельными координатами x, y звезд из изображения и экваториальными координатами α, δ звезд из каталога, с использованием которых осуществляется преобразование координат центра кадра (ПЗС-сенсора) $(x, y)_D$ в экваториальные координаты $(\alpha, \delta)_D$. При известном значении гринвичского истинного звездного времени θ выполняется пересчет от экваториальных координат в астрономические координаты Φ_D, Λ_D :

$$\Phi_D = \delta_D, \quad \Lambda_D = \alpha_D - \theta. \quad (5)$$

6. Определение итоговых астрономических координат оси вращения прибора, которые получаются осреднением астрономических координат, определенных в положении I (Φ_D^I, Λ_D^I) и положении II ($\Phi_D^{II}, \Lambda_D^{II}$). В полученные значения астрономических координат вносят поправки на наклон и движения полюса, что позволяет получить астрономические координаты Φ, Λ отвесной линии:

$$\Phi = \Phi_D^{I+II} + \delta\Phi_n^{I+II} + \delta\Phi_p, \quad \Lambda = \Lambda_D^{I+II} + \delta\Lambda_n^{I+II} + \delta\Lambda_p. \quad (6)$$

Поправки на наклон выражаются следующим образом [24]:

$$\delta\Phi_n = n_\Phi, \quad \delta\Lambda_n = n_\Lambda \sec \Phi_D, \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} n_\Phi &= \cos(\alpha + \beta)n_1m_x - \sin(\alpha + \beta)\left(\frac{n_2m_y}{\sin \varepsilon} - \frac{n_1m_x}{\tan \varepsilon}\right), \\ n_\Lambda &= \sin(\alpha + \beta)n_1m_x + \cos(\alpha + \beta)\left(\frac{n_2m_y}{\sin \varepsilon} - \frac{n_1m_x}{\tan \varepsilon}\right), \end{aligned} \quad (8)$$

где α – астрономический азимут;

β – угол взаимной ориентации осей инклинометра и ПЗС-камеры;

m_x, m_y, ε – масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра;

n_1, n_2 – показания инклинометра в положении I (0°) и II (180°).

Поправки на движение полюса выражаются следующим образом:

$$\delta\Phi_p = -(x_p \cos \Lambda - y_p \sin \Lambda), \quad \delta\Lambda_p = -(x_p \sin \Lambda + y_p \cos \Lambda) \tan \Phi, \quad (9)$$

где x_p, y_p – текущие координаты земного полюса.

Текущие координаты полюса приводятся на сайте МСВЗ [43].

При известных геодезических координатах B, L значения составляющих УОЛ по широте ζ и по долготе η находят по формулам (3).

Алгоритм определения составляющих УОЛ с традиционным методом показан на рисунке 11.

Процесс сбора данных включает получение изображения звездного неба с одновременной фиксацией времени экспозиции, получения данных инклинометра и геодезических координат местоположения. Затем происходит поворот мобильной части астроизмерителя на 180° , и процедура сбора данных повторяется во втором положении. Наблюдение в двух противоположных положениях телескопа предназначено для компенсации наклона оптической оси телескопа относительно оси вращения прибора и для уменьшения воздействия смещения нуля инклинометра [19, 39].



Рисунок 11. Алгоритм определения УОЛ традиционным методом

После процесса сбора данных начинается процесс обработки, который включает нахождение звезд на изображении, извлечение звезд из каталога, идентификацию изображенных звезд, интерполяцию точки зенита, применение поправок и в конечном итоге вычисление УОЛ.

1.3.2 Условия применения традиционного метода

Для применения традиционного метода измерений с астроизмерителем необходимо [24, 40]:

- 1) Определить калибровочные коэффициенты астроизмерителя перед началом измерений, которые во время измерений в одной точке используются как постоянные величины.
- 2) Осуществить разворот телескопа на 180° в горизонтальной плоскости с погрешностью не хуже $10''$.
- 3) Обеспечить стабильность положения горизонтального основания, на котором установлен астроизмеритель.

1.3.3 Недостатки традиционного метода

Анализ традиционного метода измерений с помощью астроизмерителя выявил ряд ее недостатков, которые состоят в следующем:

1) Необходимость определения калибровочных коэффициентов астроизмерителя перед началом измерений. Время, затрачиваемое на процедуру определения калибровочных коэффициентов, составляет около 30 минут.

2) Изменения калибровочных коэффициентов между сериями измерений, что вносит дополнительную погрешность в результаты измерений.

3) Необходимость обеспечения высокой точности разворота в горизонтальной плоскости.

4) Необходимость обеспечения стабильности горизонтального положения астроизмерителя во время измерений требует специального подготовленного основания (бетонного, металлического и др.).

1.4 Принцип действия и основные математические соотношения астрогеодезического метода определения уклонений отвесной линии

1.4.1 Шкалы времени, используемые при наблюдениях с астроизмерителями

Помимо знания координат центров звезд, для выполнения наблюдений с астроизмерителями необходимо знать момент времени наблюдения (эпоху). Наблюдения могут оказаться бесполезными, если не будет известно, к какому моменту времени их отнести. В астрономической геодезии шкалы времени используются для определения взаимной ориентации между небесной и земной системами координат.

Чтобы установить связь между астрономическими координатами Φ , Λ и экваториальными координатами α , δ , соответствующее время экспозиции, определенное с помощью ГНСС, должно быть преобразовано в GAST.

Необходимые шкалы времени и формулы для решения этой задачи приведены в таблице 5 [18, 24, 41, 42]. Необходимые соотношения между шкалами времени приводятся в бюллетенях МСВЗ [43].

Таблица 5. Определение Гринвичского звездного времени

Шкалы времени + параметры	Определение	Вычисление
T_{UTC}	Всемирное координированное время	Эпоха экспозиции кадра звездного неба
T_{UT1}	Всемирное время 1	$T_{UT1} = T_{UTC} + T_{\Delta UT1}$; $T_{\Delta UT1} \leq 0.9$ с
t_1	Юлианская эпоха t прошедшая между J2000.0 и вычисленной эпохой T_{UT1}	$t_1 = (T_{UT1} - 2451545.0) / 36525$
T_{TAI}	Международное атомное время	$T_{TAI} = T_{UTC} + T_2$, где T_2 – разница между T_{TAI} и T_{UTC} (с)
T_{TT}	Земное время	$T_{TT} = T_{TAI} + 32,184$ с
t_2	Юлианская эпоха t прошедшая между J2000.0 и вычисленной эпохой T_{TT}	$t_2 = (T_{TT} - 2451545) / 36525$
T_{GMST}	Гринвичское среднее звездное время	T_{GMST} как функция от t_1 и t_2
$\Delta\psi, \Delta\epsilon, \epsilon_0, \Omega$	Параметры нутации	модель нутации (IAU1980, IAU2000 или IAU2006) как функция от t_2
eq.eq.	Уравнение равноденствия	eq.eq. как функция от параметров нутации
T_{GAST}	Гринвичское истинное звездное время	$T_{GAST} = T_{GMST} + \text{eq.eq}$

1.4.2 Звездные каталоги

Звездный каталог – это таблица, содержащая экваториальные координаты звезд, а также их собственные движения, светимости, параллаксы и спектральные свойства. Звездные каталоги необходимы для идентификации звезд из кадра звездного неба и определения параметров преобразований, которые необходимы для пересчета пиксельных координат в экваториальные координаты.

Существуют каталоги, различающиеся по точности и плотности, например, Hipparcos, Tycho-2, UCAC, PPMXL, GAIA. Рассмотрим основные из них.

1.4.2.1 Звездный каталог *Tycho-2*

Tycho-2 – астрономический звездный каталог, содержащий координаты и собственные движения, а также двухцветные фотометрические данные для 2,5 млн. звезд, равномерно распределенных на небесной сфере [44, 45]. Точность координат звезд лучше, чем 0,1", в зависимости от звездной величины.

Основные характеристики каталога *Tycho-2* приведены в таблице 6.

Таблица 6. Основные характеристики звездного каталога *Tycho-2*

Характеристика	Значение
Эпоха координат звезд в каталоге <i>Tycho-2</i>	J2000.0
Система координат	ICRS
Число звезд	2 539 913
СКО координат: – для звезд со звездной величиной < 9 – для остальных звезд	0,007" 0,06"
СКО собственных движений:	0,0025 "/год
Систематическая погрешность: – для координат – для собственных движений	0,001" 0,0005 "/год

Данные каталога *Tycho-2* могут быть получены из сети Интернет через систему *VizieR* [46]. Специальная информация, касающаяся *Tycho-2*, размещена на официальном сайте *Tycho-2* [47]. Данные каталога *Tycho-2* представлены в текстовом формате и легко читаются с помощью любого текстового редактора.

1.4.2.2 Звездный каталог *UCAC*

UCAC – астрономический каталог военно-морской обсерватории США [48]. Версия *UCAC4* была выпущена в 2012 г. и содержит координаты и собственные движения для более 113 млн. звезд со звездной величиной от 8 до 16, со средней плотностью примерно 2000 звезд на квадратный градус и точностью лучше, чем 0,02". Основные характеристики каталога *UCAC4* приведены в таблице 7.

Таблица 7. Основные характеристики звездного каталога UCAC4

Характеристика	Значение
Эпоха координат звезд в каталоге UCAC4	J2000.0
Система координат	ICRS
Число звезд	113 780 093
СКО координат для звезд со звездной величиной меньше 14	0,02"
Систематическая погрешность координат	0,01"
СКО собственных движений звезд	0,001"/год ÷ 0,01"/год
Систематическая погрешность собственных движений	0,001"/год ÷ 0,004"/год

Данные каталога UCAC4 могут быть получены из сети Интернет через систему VizieR [49]. Специальная информация, касающаяся UCAC4, а именно, документация и программное обеспечение размещены на официальном сайте UCAC4 [50].

1.4.2.3 Звездный каталог PPMXL

PPMXL – звездный каталог, содержащий координаты и собственные движения для около 900 млн. звезд со звездной величиной до 20. Основные характеристики каталога PPMXL приведены в таблице 8 [51].

Таблица 8. Основные характеристики звездного каталога PPMXL

Характеристика	Значение
Эпоха координат звезд в каталоге PPMXL	J2000.0
Система координат	ICRS
Число звезд	Около 900 000 000
СКО координат звезд	0,08"
СКО собственных движений	0,004"/год ÷ 0,01"/год
Систематическая погрешность координат	0,01"
Систематическая погрешность собственных движений	0,001"/год ÷ 0,002"/год

Данные каталога PPMXL могут быть получены из интернета через систему VizieR [52]. Специальная информация, касающаяся PPMXL, а именно, документация и программное обеспечение размещены на сайте PPMXL [53].

1.4.2.4 Звездный каталог GAIA DR2

GAIA – космический телескоп Европейского космического агентства. Спутник с телескопом был выведен на орбиту 19 декабря 2013 г. Главная задача миссии – составить подробную карту распределения звезд нашей Галактики. Телескоп работает в оптическом диапазоне. Для максимальной тепло- и светозащиты телескоп оснащён большим разворачивающимся экраном площадью в 100 м² [54].

GAIA DR2 – звездный каталог, содержащий информацию о почти 1,3 млрд. звезд со звездной величиной до 21. В связи с тем, что спутник находится вне атмосферы Земли, миссия GAIA позволила создать звездный каталог с наивысшей на сегодняшний день точностью. Основные характеристики звездного каталога GAIA DR2 представлены в таблице 9.

Таблица 9. Основные характеристики звездного каталога GAIA DR2

Характеристика	Значение
Эпоха координат звезд в каталоге PPMXL	J2015.5
Система координат	ICRS
Число звезд	Около 1,3 млрд.
СКО координат звезд со звездной величиной меньше 15	0,00002"-0,00004"
СКО собственных движений звезд со звездной величиной меньше 15	0,00007"/год
Систематическая астрометрическая погрешность (для всех звезд)	< 0,0001"

1.4.3 Алгоритм определения составляющих уклонений отвесной линии

1.4.3.1 Общие сведения

После процесса сбора данных начинается процесс обработки. Процедура анализа данных включает первичную обработку кадра изображения звездного неба, нахождение звезд на изображении, определение координат их центров, извлечение звезд из звездного каталога, идентификацию звезд из изображения звездного неба со звездами из звездного каталога, определение параметров преобразований между идентифицированными звездами, определение астрономических

координат оси вращения, применение поправок на наклон и движения полюса и вычисление составляющих УОЛ. Отдельные промежуточные этапы описываются в следующих подразделах.

1.4.3.2 Критерии обнаружения звезд на изображении

Критериями обнаружения звезд на изображении являются:

а) *Яркость*. Для обнаружения звезд на изображении можно использовать метод сегментации изображения - *метод растущей области* [55]. Основная идея данного метода состоит в связывании пикселей с определенной минимальной яркостью и формированием одинаковых пиксельных областей. Сначала вычисляется среднее значение μ яркости изображения и среднеквадратическое отклонение σ по формулам:

$$\begin{aligned}\mu &= \frac{1}{X \cdot Y} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y I(x, y), \\ \sigma^2 &= \frac{1}{X \cdot Y - 1} \sum_{i=1}^X \sum_{j=1}^Y [I(x, y) - \mu]^2,\end{aligned}\tag{10}$$

где X, Y – размеры изображения, пиксель;

$I(x, y)$ – значение яркости пикселя с координатами x, y .

Для каждого пикселя проверяется выполнение условия – превышает ли его значение яркости некоторый определенный порог I_s :

$$I(x, y) \geq I_s = \mu + 3\sigma.\tag{11}$$

б) *Размер*. Предполагается, что звезда в диаметре состоит минимум из двух пикселей и, следовательно, охватывает при минимальных размерах четыре пикселя.

Таким образом, при выполнении приведенных выше условий генерируется область пикселей, соответствующая звезде [19].

1.4.3.3 Методы определения координат центров звезд

Для высокоточного определения астрономических координат изображенных звезд необходимо производить измерение пиксельных координат звезд из изображения с высокой точностью. После процесса обнаружения звезд начинается процесс определения координат их центров. Существуют различные методы определения координат центров звезд. Рассмотрим некоторые из них.

Метод центра тяжести (яркости) (МЦТ). Простейшим и самым известным методом определения координат центра звезд является способ определения значений средних взвешенных координат (аналог определения центра масс). В этом способе значение яркости I_i каждого пикселя, принадлежащего изображению звезды, принимается в качестве его веса. Координаты центра x_c, y_c находят по формулам [19]:

$$x_c = \frac{1}{\sum I_i} \sum_{i=1}^n x_i I_i, \quad y_c = \frac{1}{\sum I_i} \sum_{i=1}^n y_i I_i, \quad (12)$$

где n – количество пикселей, принадлежащих изображению звезды.

Метод функции рассеяния точки (МФРТ). Данный метод состоит в том, что подбирается математическое уравнение (функция), которое наилучшим образом моделирует профиль изображения звезды в предположении нормального распределения яркости [56]:

$$I(r) = I(0) \exp\left(-\frac{r^2}{2\delta^2}\right), \quad (13)$$

где r – текущее расстояние до i -го пикселя;

δ – диаметр изображения звезды;

$I(0)$ – максимальная яркость изображения звезды.

Данное уравнение можно преобразовать к виду:

$$E_i = c_0 + c_1 x_i + c_2 y_i + c_3 x_i^2 + c_4 y_i^2, \quad (14)$$

где $E_i = \ln I(r_i) + \ln I(0)$, $i = 1, n$ – число пикселей изображения звезды;

x_i, y_i – координаты i -го пикселя.

После нахождения постоянных коэффициентов c_0, c_1, c_2, c_3, c_4 координаты центра изображения звезды x_c, y_c находятся по формулам:

$$x_c = -\frac{c_1}{2c_3}, \quad y_c = -\frac{c_2}{2c_4}. \quad (15)$$

Аппроксимация формы звезды параболоидом (МАП). Более простой и удобный метод заключается в том, что в любом случае изображение звезды берется без боковых «хвостов». Т.е. при выделении звезды она обрезается по заранее вычисленному порогу, который заведомо выше уровня шума, поэтому с точки зрения вычислительной простоты целесообразно аппроксимировать изображение звезды моделью параболоида:

$$E = c_0x^2 + c_1y^2 + c_2xy + c_3x + c_4y + c_5. \quad (16)$$

Коэффициенты c_i входят в формулу линейно и оцениваются методом наименьших квадратов без итеративных процедур.

После нахождения коэффициентов c_i , координаты центров звезд находятся по формулам:

$$x_c = \frac{c_2c_3 - 2c_4c_0}{4c_1c_0 - c_2c_2}, \quad y_c = \frac{c_2c_4 - 2c_3c_1}{4c_1c_0 - c_2c_2}. \quad (17)$$

Существуют и другие методы определения координат центров звезд: метод «равных энергий», метод фиксированных уровней освещенностей, корреляционно-экстремальный метод, метод квадратной области и др. [57-65]. Однако эти методы или по точностным характеристикам или по сложности реализации уступают приведенным выше методам и в основном используются в специальных задачах.

1.4.3.4 Касательная проекция

После определения геодезических координат местоположения и Гринвичского истинного звездного времени с использованием времени экспозиции кадра звездного неба из звездного каталога выделяется приближенная область с учетом поля зрения телескопа, соответствующая полученному кадру звездного неба. За-

тем, зная экваториальные координаты выделенных звезд из звездного каталога, их собственные движения и время экспозиции, выполняется процесс редукции (пересчет координат звезд от эпохи звездного каталога на эпоху наблюдения). Так как экваториальные координаты α , δ опорных звезд определены на сфере, а пиксельные координаты звезд изображения x , y представляют собой координаты в системе координат плоскости ПЗС-сенсора, связь между этими двумя системами координат устанавливается с помощью координат касательной плоскости X , Y (стандартные координаты) [66]:

$$\begin{aligned} ctgq &= ctg\delta \cdot \cos(\alpha - \alpha_0), \\ X &= \frac{tg(\alpha - \alpha_0) \cdot \cos q}{\cos(q - \delta_0)}, \\ Y &= tg(q - \delta_0). \end{aligned} \quad (18)$$

Уравнение обратного преобразования [67]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \alpha_0 + arctg \left(\frac{X}{\cos \delta_0 - Y \sin \delta_0} \right); \\ \delta &= arctg \left(\frac{(Y + \tan \delta_0) \cos(\alpha - \alpha_0)}{1 - Y \tan \delta_0} \right). \end{aligned} \quad (19)$$

1.4.3.5 Процесс идентификации

Процесс идентификации состоит в том, что по пиксельным координатам звезд из изображения x , y и касательным координатам X , Y звезд из звездного каталога строятся всевозможные треугольники [19, 68-71]. Далее осуществляется процесс перебора, в котором каждый треугольник из изображения сравнивается со всеми треугольниками из звездного каталога с целью определения подобия.

Идентификация треугольников из звезд

Для решения задачи идентификации необходимо сопоставить объекты, содержащиеся в двух областях: на изображении звездного неба и в звездном каталоге. Наиболее используемыми и простыми методами идентификации являются геометрические. Геометрический метод предполагает составление из звезд, попавших в поле зрения объектива, различных геометрических фигур. В качестве

базовых характеристик для распознавания используются межзвездные угловые расстояния, сферические углы, образуемые звездами на небесной сфере, отношения сторон, периметры, площади и прочие характеристики, с последующим сравнением их с таковыми же вычисленными для звезд из каталога. Например, признак подобия треугольников.

Метод 1. Перебираются все возможные конфигурации треугольников со сторонами $c \geq b \geq a$. На основе длин каждой стороны вычисляются отношения:

$$x_t = \frac{b}{c}, \quad y_t = \frac{a}{c}, \quad (20)$$

где x_t, y_t – декартовы координаты в системе соотношения сторон.

Так как Y_t представляет собой отношение самой короткой стороны к самой длинной и так как идентификация близко расположенных звезд может вызвать дополнительные трудности, этот фактор может быть ограничен. Например, $y_t > 0,125$. Для идентификации подобных треугольников параметры x_{t1}, y_{t1} для изображенных звезд и x_{t2}, y_{t2} для опорных звезд должны удовлетворять следующим условиям:

$$|x_{t1} - x_{t2}| < \varepsilon \wedge |y_{t1} - y_{t2}| < \varepsilon. \quad (21)$$

Ограничивающий фактор ε может быть установлен на уровнях 0,0005 и 0,001 соответственно [19].

Метод 2. Идентификацию подобных треугольников из звезд можно выполнить, вычисляя отношение самой длинной и самой короткой сторон треугольника и косинуса угла между ними:

$$R = \frac{c}{a}, \quad C = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2 \cdot a \cdot c}. \quad (22)$$

Затем вычисляются ограничивающие факторы для R и C :

$$\begin{aligned} t_R^2 &= 2 \cdot R^2 \cdot F, \\ t_C^2 &= 2 \cdot S^2 \cdot F + 3 \cdot C^2 \cdot F^2, \end{aligned} \quad (23)$$

где

$$F = \varepsilon^2 \cdot \left(\frac{1}{c^2} - \frac{C}{a \cdot c} + \frac{1}{a^2} \right), \quad (24)$$

где S – синус угла;

ε – ограничивающий фактор совпадений ($=0,001$).

Ограничивающее значение для R обычно составляет 8-10 [69].

Для совпадающих треугольников из изображения A и из звездного каталога B должны выполняться следующие соотношения:

$$\begin{aligned}(R_A - R_B)^2 &< t_{RA}^2 + t_{RB}^2, \\ (C_A - C_B)^2 &< t_{CA}^2 + t_{CB}^2.\end{aligned}\tag{25}$$

Этот критерий генерирует одинаковые листы совпадающих треугольников независимо от любых факторов (повороты, увеличение и т.д.).

Метод 3. Идея данного алгоритма распознавания звезд основывается на вычислении угловых расстояний между звездами в наблюдаемой группе и сравнении этих расстояний с таковыми же, но вычисленными для звезд из каталога [61]. По измерениям абсцисс x и ординат y энергетических центров изображений звезд рассчитываются косинусы углов β_{ij} между направлениями на каждую пару отобразившихся звезд по формулам:

$$\begin{aligned}\cos \beta_{ij} &= l_i \cdot l_j + m_i \cdot m_j + n_i \cdot n_j, \\ l &= \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, \quad m = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}}, \quad n = \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2 + f^2}},\end{aligned}\tag{26}$$

где f – фокусное расстояние телескопа, мм;

i, j – порядковые номера звезд на изображении.

Для звезд из приближенной области определяются угловые расстояния между парами звезд по следующим формулам:

$$\begin{aligned}\cos \beta_{ij} &= l_i \cdot l_j + m_i \cdot m_j + n_i \cdot n_j, \\ l &= \cos \delta \cdot \cos \alpha, \quad m = \cos \delta \cdot \sin \alpha, \quad n = \sin \delta,\end{aligned}$$

где i, j – порядковые номера звезд в каталоге;

δ – склонение звезды, рад;

α – прямое восхождение звезды, рад.

Затем происходит сравнение вычисленных значений для звезд из изображения и для звезд из звездного каталога:

$$|\cos \beta k - \cos \beta u| < \varepsilon, \quad (27)$$

где ε – параметр сравнения.

Идентификация звезд

После нахождения совпадающих треугольников из звезд начинается непосредственная идентификация одинаковых звезд. Из звезд, которые находятся в соответствующих вершинах идентифицированных треугольников, формируются пары, которые заносятся в таблицу соответствий. Размер таблицы соответствий $N1, N2$, где $N1$ – количество звезд в каталоге, $N2$ – количество звезд в кадре звездного неба. Пример таблицы соответствий приведен на рисунке 12.

Каждый раз, когда выполняется условие (21, 25 или 27), количество совпадений увеличивается на единицу. Пары звезд, совпавшие большее количество раз, считаются идентифицированными.

		Номера звезд из изображения												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Номера звезд из звездного каталога	1	31	0	0	0	2	4	0	0	0	0	0	0	1
	2	1	0	0	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0
	3	2	2	0	0	5	2	0	0	0	0	0	0	0
	4	3	32	0	1	2	2	0	0	0	0	0	0	1
	5	3	3	21	0	5	3	0	1	0	1	0	0	1
	6	0	2	1	25	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	7	2	1	0	0	36	0	0	0	0	0	0	0	1
	8	1	2	0	0	4	33	0	0	0	1	0	0	1
	9	1	0	0	1	4	1	1	0	0	0	0	0	0
	10	2	0	2	2	0	7	1	0	0	0	0	0	0
	11	0	1	0	0	1	1	0	2	1	0	1	0	0
	12	2	0	0	0	4	2	16	0	1	0	1	0	1
	13	2	0	0	0	7	0	0	40	0	0	1	0	1
	14	0	0	0	1	1	1	0	0	40	0	0	0	0
	15	1	0	1	1	0	4	1	2	0	0	0	1	0
	16	0	1	1	0	0	2	2	0	1	3	0	1	0
	17	1	3	1	0	1	5	0	1	0	0	0	1	0
	18	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	19	2	0	0	0	3	0	0	0	0	1	0	0	1
	20	2	0	0	0	7	3	0	1	2	0	33	0	1
	21	0	0	2	0	2	2	0	3	2	0	0	9	26
	22	1	1	1	2	4	5	1	4	0	0	1	22	0
	23	0	0	1	0	0	7	3	1	2	0	0	0	0

Рисунок 12. Пример таблицы соответствия. Зеленым цветом выделены количество совпадений

1.4.3.6 Параметры преобразования

Касательные координаты опорных звезд X, Y из звездного каталога связаны с прямоугольными координатами центров звезд x, y в кадре звездного неба. В об-

щем случае эту связь можно аппроксимировать посредством полиномиального преобразования [14]:

$$X = A_{00} + \sum A_{ij} x^i y^j; \quad Y = B_{00} + \sum B_{ij} x^i y^j, \quad (28)$$

где x, y – пиксельные координаты центров звезд из кадра звездного неба;

X, Y – стандартные координаты звезд из звездного каталога;

A_{ij}, B_{ij} – коэффициенты преобразований.

В случае отсутствия искажений в оптической системе телескопа используется линейное (аффинное) преобразование (6 параметров), которое записывается следующим образом:

$$X = a_1 + b_1 \cdot x_i + c_1 \cdot y_i; \quad Y = a_2 + b_2 \cdot x_i + c_2 \cdot y_i. \quad (29)$$

Также существуют преобразование Гельмерта (четыре параметра) и проективное преобразование (восемь параметров), которые также представляют собой линейные преобразования [19, 41, 72-74].

Параметры преобразований вычисляются методом наименьших квадратов [75, 76]. Они используются для преобразования пиксельных координат центра кадра (ПЗС-сенсора) в экваториальные координаты (см. п. 1.3.1).

1.5 Выводы по главе 1

В главе рассмотрены известные методы измерения УОЛ, их точностные характеристики и основные недостатки. Проведенный анализ обзора показывает, что на сегодняшний день астрономо-геодезический метод определения УОЛ, который реализуется в астроизмерителях, превосходит остальные методы как по точностным характеристикам, так и оперативности, что говорит о перспективности этих приборов.

Рассмотрены существующие реализации астроизмерителей УОЛ, их метод измерений и основные математические соотношения астрономо-геодезического метода определения УОЛ.

В целом, в процессе анализа выявлено следующее:

1) гравиметрический и спутниковый дифференциальный методы определения УОЛ обладают низкой оперативностью и невысокой точностью;

2) метод определения УОЛ с использованием моделей ГПЗ обладает низкой точностью и низкой разрешающей способностью (18-20 км), что не позволяет изучить тонкую структуру распределения УОЛ;

3) традиционный метод измерений, используемый в существующих астроизмерителях, обладает следующими недостатками:

– калибровочные коэффициенты астроизмерителя необходимо определять перед началом измерений в каждой точке. Время, затрачиваемое на процедуру определения калибровочных коэффициентов, составляет около 30 минут;

– калибровочные коэффициенты изменяются между сериями измерений, что вносит дополнительную погрешность в итоговые результаты;

– необходимо обеспечить высокую точность разворота телескопа в горизонтальной плоскости;

– для обеспечения жесткости горизонтальной плоскости месторазмещения астроизмерителя необходимо использование специального основания (бетонного, металлического и др.).

4) алгоритм обработки данных наблюдений предполагает возможность использования различных звездных каталогов, методов определения координат центров звезд и методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу.

В связи с этим, задачи последующих исследований состоят в следующем:

1) Обзор известных методов измерений УОЛ, анализ основных источников погрешностей и метода измерений известных конструкций астроизмерителей УОЛ.

2) Разработка нового метода повышения точности и оперативности измерений УОЛ с астроизмерителями.

3) Разработка программно-математической модели (ПММ) астроизмерителя для проверки работоспособности и отладки алгоритмов нового метода измерений в лабораторных условиях.

4) Разработка астроизмерительного испытательного стенда на основе макета астроизмерителя для испытания нового метода в условиях реального звездного неба.

5) Оценка точности разработанного метода измерений УОЛ на астроизмерительном испытательном стенде в полевых условиях.

6) Создание высокодискретной карты УОЛ с испытательным стендом на основе нового метода и сравнение с модельными значениями УОЛ.

2. АНАЛИЗ ИСТОЧНИКОВ ПОГРЕШНОСТЕЙ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЕЙ

2.1 Описание основных источников погрешностей

Как было отмечено выше, основными компонентами астроизмерителя являются:

- телескоп и ПЗС-камера для получения кадров звездного неба и определения астрономических координат;
- цифровой инклинометр для определения текущего наклона телескопа по осям OX и OY ;
- ГНСС-приемник с антенной для определения геодезических координат местоположения и для привязки к шкале времени UTC.

В связи с этим, модель измерений составляющих УОЛ ξ, η можно записать в следующем виде [77]:

$$\begin{cases} h(\xi, B, \Phi, inclX) = 0, \\ h(\eta, L, \Lambda, inclY, t_{UTC}) = 0, \end{cases} \quad (30)$$

где B, L – геодезические широта и долгота;

Φ, Λ – астрономические широта и долгота;

$inclX, inclY$ – текущий наклон телескопа по осям OX и OY ;

t_{UTC} – время экспозиции кадра звездного неба в шкале UTC.

Таким образом, основными источниками погрешности измерений УОЛ с астроизмерителем являются [14, 19, 24, 32]:

- 1) погрешность определения геодезических координат;
- 2) погрешность определения астрономических координат (астрометрическая погрешность);
- 3) погрешность выставления прибора в горизонтальной плоскости;
- 4) погрешность определения времени начала экспозиции кадра звездного неба в шкале UTC.

Рассмотрим ниже более подробно все источники погрешностей при наблюдениях с астроизмерителем.

Кроме того, рассмотрим влияние атмосферной рефракции на результаты наблюдений и источники вариации УОЛ.

2.2 Погрешность определения Гринвичского звездного времени

Согласно формуле (3) погрешность определения гринвичского звездного времени (GAST) напрямую влияет на точность определения астрономических координат местоположения и в итоге на точность определения УОЛ. В п. 1.4 приведены основные шкалы времени, используемые при определении GAST. Для высокоточного определения времени экспозиции кадра звездного неба современные ПЗС-камеры имеют вход внешнего источника сигнала. В качестве источника сигнала для синхронизации времени наблюдений с астроизмерителем можно использовать электрический сигнал 1 импульс/с (1 pps – pulse per second) от ГНСС-приемника. Некоторые ГНСС-приемники формируют секундную метку времени (1 pps) с погрешностью синхронизации к шкале времени UTC на уровне долей микросекунд. Это позволяет обеспечить привязку собственной шкалы времени к шкале времени UTC с требуемой точностью синхронизации наблюдений в 1 мс (0,015") [19].

2.3 Погрешность выставления астроизмерителя в горизонтальной плоскости

Точность выставления астроизмерителя по горизонту (по касательной к геоиду) играет фундаментальную роль в определении направления отвесной линии. Инклинометр устанавливает связь между направлением оси вращения прибора и направлением отвеса. Технические характеристики наиболее употребляемых высокоточных цифровых инклинометров приведены в таблице 10 [78-80].

Таблица 10. Технические характеристики некоторых высокоточных цифровых инклинометров

Наименование	Характеристика для инклинометра		
	HRTM (Lippman)	ZEROTRONIC type C	Nivel 210
Диапазон измерений	$\pm 600''$	$\pm 0,5^\circ$	$\pm 620''$
Время измерений, с	0,001	0,1	0,3
Погрешность	0,05"-0,1"	0,15"-0,2"	0,6" в диапазоне измерений $\pm 300''$; 1" в остальном диапазоне

2.4 Погрешность определения геодезических координат местоположения

Согласно уравнению (2), погрешность определения геодезических координат B , L непосредственно влияет на погрешность определения УОЛ ξ , η . Следовательно, они должны быть определены с достаточно высокой точностью, чтобы сохранить влияние ниже $0,01''$. Это соответствует погрешности определения геодезической широты на уровне 17 см (для широты Москвы), геодезической долготы – 30 см. Одна из возможностей получения таких точностей – на основе получение поправок от базовой станции через GSM-модуль в приемнике (режим «Кинематика в реальном времени») [81]. Другая возможность – пост-обработка ГНСС измерений.

2.5 Астрометрическая погрешность

2.5.1 Общие сведения

Процесс обработки полученных кадров звездного неба начинается с нахождения звезд на изображении и определении координат их центров с использованием различных методов (см. п. 1.4.3). Затем после процесса идентификации звезд из изображения со звездами из звездного каталога происходит определение параметров преобразований между проидентифицированными звездами с использованием разных методов преобразований (см. п. 1.4.3). Эти параметры преобразований используются для пересчета пиксельных координат центров звезд в экватори-

альные координаты. При этом на точность вычисляемых экваториальных координат для звезд из кадра звездного неба влияет точность определения координат их центров и искажения, которые возникают в оптической системе телескопа.

Экваториальные координаты звезд в звездных каталогах приведены с высокой точностью (например, для звездного каталога GAIA DR2 точность координат звезд находится на уровне 0,00002") и используются в качестве опорных координат. Разность вычисленных для звезд из кадра звездного неба экваториальных координат и опорных экваториальных координат звезд из звездного каталога могут быть использованы для оценки точности метода определения координат центров звезд.

Таким образом, погрешность астрометрии включает:

- а) погрешность звездных каталогов;
- б) погрешность определения координат центров звезд;
- в) погрешность методов преобразований;
- г) искажения в оптической системе телескопа.

2.5.2 Погрешность звездных каталогов

В таблице 11 приводится сравнение некоторых звездных каталогов.

Таблица 11. Сравнительная характеристика некоторых звездных каталогов

Наименование характеристики	Значение для звездного каталога			
	Tycho-2	UCAC4	PPMXL	GAIA DR2
Количество звезд, млн.	2,5	113	900	1300
Звездная величина, m	11,5	16	20	21
Эпоха	J2000.0	J2000.0	J2000.0	J2015.5
Система координат	ICRS	ICRS	ICRS	ICRS
СКО координат	0,007" - 0,06"	0,02"	0,08"	0,00002"
Систематическая погрешность	0,001"	0,01"	0,01"	0,0001"

Звездные каталоги содержат экваториальные координаты звезд, отнесенные на определенную эпоху - J2000.0 или J2015.5. Положения звезд подвержены влиянию различных зависящих от времени явлений, которые должны быть учтены при наблюдениях с астроизмерителями. Эти явления включают *собственное*

движение (эффективное изменение координат звезд), *прецессию* и *нутацию Земли* (смещение системы координат), *рефракцию*, *суточную* и *годовую абберацию*, а также *гравитационное отклонение света* [15, 19, 81-84].

В связи с этим необходимо выполнить процесс пересчета средних координат звезд от эпохи звездного каталога на эпоху наблюдения с учетом всех вышеуказанных факторов (процесс редукции звезд). Это можно сделать с использованием свободно распространяемых библиотек, например, NOVAS, SOFA, PinPoint, Astrometry [34, 36, 85, 86]. При этом согласно [83], погрешность редукции координат звезд составляет не более 0,001".

Исследования по оценке влияния звездных каталогов Tycho-2 и UCAC2 на итоговые значения УОЛ проведены в работе [24]. В работе показано, что среднее влияние каталогов на итоговые значения УОЛ не превышает 0,02", что является пренебрежимо малой величиной. Следует заметить, что каталог UCAC2 не покрывает весь земной шар, и уже для широты Москвы данный каталог не пригоден для использования.

2.5.3 Погрешность определения координат центров звезд

Задача измерения координат центров изображений звезд в системе координат ПЗС-сенсора является одним из ключевых этапов алгоритмической обработки графической информации в астроприборах [87]. Наиболее употребляемые методы определения координат центров звезд подробно описаны в главе 1. Исследованию точностей данных методов посвящены много научных работ [19, 62, 88-94]. В целом, все авторы утверждают, что методы определения координат центров звезд дают погрешности на субпиксельном уровне.

При этом достоинством метода центра тяжести является простота реализации, быстрое получение оценки координат и её устойчивость, поскольку для его применения отсутствует необходимость знания закона распределения интенсивности светового потока.

Метод функции рассеяния точки и метод аппроксимации формы звезды параболоидом базируется на аппроксимации формы звезды некоторой поверхностью. При этом предполагается, что интенсивность светового потока распределена по нормальному закону. За счет аппроксимации они являются более сложными в применении и могут давать неустойчивый результат при сильных отклонениях формы пятна от предположения.

2.5.4 Искажения в оптической системе телескопа

2.5.4.1 Юстировка телескопа для устранения искажений в оптической системе телескопа

Важным аспектом эксплуатации любого телескопа является правильная юстировка его оптической системы, которая необходима для получения качественных изображений звездного неба. На заводе при изготовлении выполняется точная юстировка телескопа. Однако при транспортировке телескопа или иных воздействиях может произойти его разъюстировка, которая может привести к уменьшению оптической эффективности телескопа, и абберрация в телескопе приведет к искажению изображений звезд в кадре звездного неба.

Можно сделать заключение, что периодическая юстировка телескопа является важным этапом для получения кадров звездного неба с высоким качеством. Для этого необходимо иметь специальный юстировочный стенд. На сегодняшний день существуют различные простые в конструкции средства для выполнения процесса юстировки телескопа в лабораторных условиях. Например, таким средством может служить лазерный коллиматор [95].

Искусственная звезда никогда не может имитировать реальную звезду, потому что невозможно выполнить настройку телескопа с фокусом, установленным на бесконечность. После того как выполнена юстировка телескопа с искусственной звездой, нужно настроить фокус телескопа обратно на бесконечность перемещением главного зеркала телескопа в другое положение. Поэтому лучше всего

выполнить юстировку телескопа при фокусе, установленном на бесконечность, чтобы избежать оптических смещений в телескопе. Лазерный коллиматор может выполнить эту задачу. При этом регулируется вторичное зеркало с помощью трех юстировочных винтов, расположенных в передней части телескопа.

Лазерный коллиматор имеет три встроенных лазера, равномерно расположенные друг относительно друга. Три параллельных лазерных луча имитируют световой путь от далекой звезды и проходят через оптические элементы телескопа и отражаются обратно. Основная идея состоит в том, чтобы все три лазерные отраженные лучи оказались на одном и том же кольце мишени коллиматора (рисунок 13).

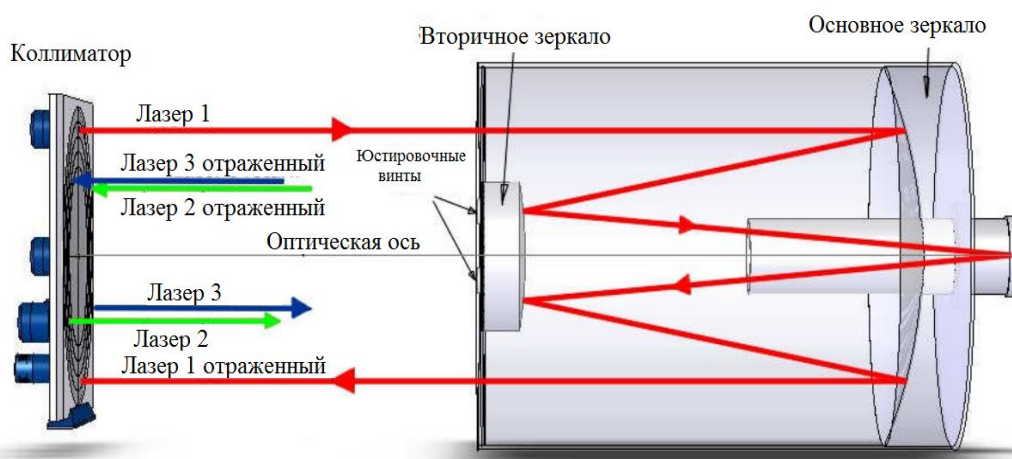


Рисунок 13. Лазерный коллиматор для юстировки телескопа

2.5.4.2 Оценка величин искажений в кадре звездного неба

Условия реальных наблюдений звездного неба всегда отличаются от лабораторных условий, при которых выполняется юстировка оптической системы телескопа. К тому же, нецелесообразно каждый раз перед наблюдениями с астроизмерителем выполнять юстировку оптической системы телескопа, так как это потребует полной разборки и сборки астроизмерителя.

Оценку величин искажений в кадре звездного неба можно выполнить по реальным кадрам звездного неба следующими способами:

– На основе методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу.

Методы определения параметров преобразований между идентифицированными звездами из кадра звездного неба и из звездного каталога приведены в п. 1.4. В общем случае используется полиномиальное преобразование между идентифицированными звездами, в случае отсутствия искажений в оптической системе телескопа – аффинное (линейное) преобразование, т.е. сравнение полинома разной степени и аффинного метода позволит оценить величину искажений. В работе [19] проводилось сравнение линейных методов преобразований: метода Гельмерта (4 параметра) и аффинного (6 параметров) метода. Автор нашел, что влияние разных методов привязки на значения УОЛ не превышает 0,01". В работах [32, 38-40] авторы используют только аффинное преобразование.

– На основе оценки изменений масштабного коэффициента пикселя. Масштабный коэффициент пикселя представляет собой отношение углового расстояния пар звезд в кадре звездного неба к пиксельному расстоянию между этой же парой звезд.

Для исследования масштабного коэффициента пикселей в полученном кадре звездного неба сначала необходимо выполнить процесс идентификации звезд из изображения со звездами из звёздного каталога. Затем рассчитываются угловые расстояния ρ_{deg} для идентифицированных звезд из каталога и пиксельные расстояния ρ_{pix} для тех же звезд из кадра звездного неба. Угловые расстояния рассчитываются по следующей формуле [96]:

$$\cos \rho_{deg} = \sin \delta_1 \cdot \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cdot \cos \delta_2 \cdot \cos(\alpha_1 - \alpha_2), \quad (31)$$

где α_1, δ_1 – экваториальные координаты первой звезды, рад;

α_2, δ_2 – экваториальные координаты второй звезды, рад.

Пиксельные расстояния между парами звезд рассчитываются по следующей формуле:

$$\rho_{pix} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (32)$$

где x_1, y_1 – координаты первой звезды в кадре, пиксели;

x_2, y_2 – координаты второй звезды в кадре, пиксели.

Отношение угловых расстояний звезд к пиксельным расстояниям дает масштабный коэффициент пикселей $m = \rho_{deg} / \rho_{pix}$, а изменение этого коэффициента по кадру характеризует искажения в кадре (нелинейность в кадре).

2.6 Влияние атмосферной рефракции на результаты наблюдений

2.6.1 Общие сведения

При прохождении атмосферы Земли лучи света от звезды попадают в среду с изменяющимся показателем преломления. На больших расстояниях от поверхности Земли (в безвоздушном пространстве) показатель преломления равен 1 и скорость света равна скорости света в вакууме. В атмосфере показатель преломления уже не равен 1 и меняется в зависимости от плотности воздуха. В результате путь света от звезды в атмосфере не является прямой линией.

Из-за рефракции наблюдатель видит звезду на зенитном расстоянии ζ , тогда как её реальное зенитное расстояние (при отсутствии атмосферы) равно z . Под астрономической рефракцией понимают смещение небесного объекта на угол φ относительно его истинного положения при прохождении света через атмосферу Земли:

$$\varphi = z - \zeta.$$

Показатель преломления зависит от плотности воздуха, меняющейся вдоль траектории луча света. Так как точный закон изменения плотности с высотой неизвестен, то точное определение величины рефракции невозможно. В оптическом диапазоне рефракция является одним из главных факторов, ограничивающих точность позиционных наблюдений.

Атмосферная рефракция может быть разделена на радиально-симметрическую (нормальную) и асимметрическую (аномальную) компоненты.

Теория радиально-симметрической рефракции предполагает сферически симметрическое распределение плотности атмосферы. Этот хорошо известный

эффект, как считается, исчезает в зените. Сегодня доступны очень точные модели непосредственно для вычисления радиально-симметрической составляющей рефракции (например, [15, 97, 98]).

Ассимметрическая рефракция, также известная как аномальная рефракция (АР), является частью атмосферной рефракции, которая не может быть вычислена в рамках какой-либо модели. АР преломляет лучи света от звезды в зените и вызывается наклоном атмосферных слоев, которые часто связывают с градиентами температуры или давления в атмосфере, а также конвективными движениями атмосферных масс.

Амплитуда АР значительна в диапазоне от 15 до 0,02 Гц (от 0,07 до 50 с) [99]. Отсюда следует, что оптимальное время экспозиции должно быть не менее 50 с. Однако, так как наблюдения с астроизмерителями проводятся в зените и невозможно выполнить часовое ведение, большое время экспозиции приведет к вытягиванию изображений звезд, вызванному суточным вращением Земли, что в свою очередь усложнит процесс определения координат центров звезд. В связи с этим при наблюдениях с астроизмерителями время экспозиции выбирается маленьким (обычно 0,2 – 0,5 с). Как видно, время экспозиции попадает в диапазон максимальной амплитуды АР, и поэтому АР является одним фактором, влияющим на точность прибора.

2.6.2 Некоторые теоретические и эмпирические исследования аномальной рефракции

Данные об АР основаны, прежде всего, на анализе метеорологических данных и астрономических наблюдений.

Анализ метеорологических данных

Метеорологический анализ данных подразумевает измерения температуры и давления либо с наземных станций, либо с использованием радиозондов (получение вертикальных профилей). Градиенты температур или давления между двумя станциями или профилями могут быть преобразованы в углы наклона слоев

атмосферы. Основываясь на опубликованных данных радиозондов, автор в работе [100] обнаружил амплитуды ΔP , зависящие от сезона (примерно в $0,01''$), и производные амплитуды $0,04''$. В работе [19], автор, используя наблюдаемые градиенты давления в горной местности, нашел эффекты ΔP от $0,03''$ до $0,17''$ в зените.

Автор работы [101] использовал алгоритмы трассировки лучей наряду с 4D наборами метеорологических данных (3D поля температур и давлений в зависимости от времени). Метеорологические данные с высоким разрешением, даваемые комплексом COSMO-2 [102], обеспечивают метеорологические данные от 30 м до 20 000 м в атмосфере с 2,2 км горизонтальным и часовым временным разрешением. В тестовом полигоне в Швейцарии 4D-модель трассировки лучей через слои атмосферы позволила оценить эффекты ΔP на уровне $0,1''$ в зените.

Анализ астрономических наблюдений

Повторные наблюдения астрономических координат Φ , Λ в течение многих различных ночей (с разными атмосферными условиями) являются важным источником для определения средней амплитуды ΔP . Такие наблюдательные данные доступны с использованием астролябии или фотографических зенитных труб (photographic zenith tubes – PZT), которые использовались в 20 в. для определения параметров ориентации Земли (например, [103]), или с использованием современных цифровых зенитных камер (например, [104]).

Проанализировав данные Потсдамской астролябии, автор работы [105] получил среднее влияние ΔP на уровне $0,06''$. Основанное на наблюдениях PZT в Вашингтоне и Флориде в течение многих лет, автор работы [106] оценил среднюю амплитуду ΔP на уровне $0,08''$ - $0,09''$ на пунктах наблюдений. Проанализировав наблюдения PZT в Токио, автор работы [107] получил погрешность $0,04''$ для пяти дней наблюдений и $0,03''$ для месяца, свидетельствующую о некотором смягчении эффекта ΔP при формировании средних значений в течение нескольких дней.

На основе использования астроизмерителя авторы работы [23] выполняли многократные определения УОЛ на контрольном пункте в Германии в течение

100 ночей (период 2003-2006 гг.). На основе одночасовых наблюдений в течение ночи они получили погрешность $\sim 0,05''$. Кроме того, было обнаружено, что дополнительные наблюдения не улучшают точность. Поэтому сделано заключение, что «АР ограничивает достижимую точность определения УОЛ (с цифровой зенитной камерой) в течение одной ночи на уровне $0,04'' - 0,05''$ ».

В последнее время используются астрономические телескопы с ПЗС-сенсорами для непрерывных измерений рефракции, что обеспечивает представление о флуктуации АР во времени. Основная идея состоит в сравнении с высоким разрешением временных рядов (т.е. последовательности единичных измерений) значений астрономических координат Φ , Λ или направлений на звезды относительно некоторых (длительных) средних значений, полученных в течение многих наблюдений. Средние значения предполагаются в значительной степени свободными от влияния АР, и остаточная разница показывает поведение атмосферы над телескопом в определенный момент времени.

Авторы работы [108] опубликовали, вероятно, первые временные непрерывные измерения рефракции с 20-см зенитным телескопом. Они опубликовали средний эффект («атмосферная погрешность») на уровне $\sim 0,09''$ в зените, которая, однако, может быть уменьшена за счет метода усреднения. В работе [104] автор использовал также астроизмеритель для мониторинга аномальной рефракции в течение 70 ч и нашел волнообразные и скачкообразные вариации примерно в $0,05''-0,2''$ в течение нескольких часов и указывающие присутствие эффектов низкочастотной АР $\sim 0,04''$ в течение нескольких дней.

В работе [98] автор в течение года изучал характеристики и флуктуации АР с различными телескопами с апертурой от 25 см до 2,5 м оснащенные ПЗС-камерами. Для всех наблюдений автор нашел «вездесущее присутствие АР». Автор характеризует АР как «квазипериодическую с периодом, изменяющимся от минут до часов и амплитудой от $0,1''$ на временных шкалах несколько минут и до $0,5''$ - от десятков минут до нескольких часов».

Хотя, приведенные выше исследования дают некоторые представления об АР, бесспорно нужны последующие исследования для понимания сложной природы АР.

Смягчение воздействия аномальной рефракции

Из приведенного выше обзора литературы, можно сделать заключение, что влияние АР может быть снижено путем формирования средних значений результатов измерений за определенный период времени. Поправки за АР могут быть также вычислены с помощью оценки интегралов рефракции, «если метеорологические условия были известны вдоль линии видимости за все время» [108]. Эта информация может быть получена из доплеровского радара, лидарных измерений и от радиозондов, но, как правило, для большинства пунктов наблюдений недоступны. Однако этот подход находится в зачаточном состоянии, и эффективность этого подхода не до конца изучена [101].

2.7 Вариации уклонений отвесной линии

Гравиметрия активно используется при определении деформаций различных объектов методом высокоточных повторных геодезических измерений. Особенно актуально этот вопрос стоит на геодинамических полигонах, созданных в районах крупных гидроэлектростанций. При их эксплуатации уровень воды в водохранилище (пример – Красноярское водохранилище) может меняться на несколько десятков метров, что вызывает значительные изменения локального гравитационного поля в районе этого водохранилища. Расчеты, проведенные в [3] показали, что изменение уровня воды в Красноярском водохранилище с 225 до 250 м вызывает изменение локального гравитационного поля на 1,5 – 2 мГал. В свою очередь, изменение гравитационного поля на это значение вызывает изменение УОЛ в прибрежной части водохранилища на величину до 0,3" – 0,5". В той же работе выполнены расчеты для Саяно-Шушенского водохранилища, которые показали, что вариации силы тяжести, обусловленные изменением уровня воды от

225 до 250 м вблизи береговой линии могут достигать 1 мГал, а вариации УОЛ при этом могут составить 0,2".

Для Куйбышевского водохранилища подобные исследования проводились в работе [109]. Уровень воды Куйбышевского водохранилища может изменяться от 46 м до 55 м. В связи с этим колебания отвесной линии в плоскости меридиана могут достигать 0,029". Также авторами рассмотрено изменение уровня грунтовых вод в зависимости от изменения уровня воды Куйбышевского водохранилища. Получено, что при изменении уровня грунтовых вод на 6 м, изменение УОЛ в меридиане может составлять 0,0053". Таким образом, полное изменение УОЛ в меридиане может составлять 0,0342".

Авторы работы [110, 111] сравнивали результаты астрономических наблюдений и гравиметрических измерений для Пекинской обсерватории и Юзефославской обсерватории для исследования вариации УОЛ. Результаты показывают, что вариации УОЛ составляют 0,05" и 0,02" соответственно. Однако авторами не высказываются предположения на счет причин, вызывающих вариации УОЛ.

В работе [112] для исследования вариации УОЛ сравнивались данные гравиметрических наблюдений, выполненные в период с 1986 по 1996 гг. Авторами обнаружено изменение УОЛ со временем с амплитудой до 0,02".

Таким образом, изменения значения силы тяжести в 1 мГал приводит к изменению УОЛ примерно на 0,2". Значение вариации силы тяжести вследствие лунно-суточных приливов составляет не более 200 мкГал, что соответствует примерно вариации УОЛ на уровне 0,04". Изменение уровня грунтовых вод также вызывает вариации УОЛ, однако влияние находится на уровне ниже чем 0,01". Значение аномальной рефракции может доходить до 0,5". Таким образом, можно сделать вывод, что на изменение значения УОЛ наибольшее влияние оказывает именно аномальная рефракция.

2.8 Выводы по главе 2

В главе проведен анализ основных источников погрешностей при наблюдениях с астроизмерителем. Анализ показал, что основными источниками погрешностей являются:

- 1) погрешность определения геодезических координат;
- 2) погрешность определения текущего наклона телескопа;
- 3) погрешность определения времени начала экспозиции кадра звездного неба в шкале UTC;
- 4) погрешность определения астрономических координат (астрометрическая погрешность).

Первые три источника погрешностей являются «инструментальными». Астрометрическая погрешность включает:

- погрешность звездных каталогов;
- погрешность определения координат центров звезд;
- погрешность привязки кадра звездного неба к звездному каталогу;
- искажения в оптической системе телескопа.

При этом существуют различные методы определения координат центров звезд, высокоточные звездные каталоги и методы привязки кадров звездного неба к звездному каталогу. Рассмотрены пример юстировки оптической системы телескопа с использованием простой в конструкции лазерного коллиматора и методы для оценки величин оптических искажений. Проведен анализ влияния атмосферной рефракции на результаты наблюдений. Он показал, что влияние атмосферной рефракции может быть снижено путем формирования средних значений результатов измерений за определенный период времени. Изменение уровня грунтовых вод и лунно-солнечные приливы приводят к вариациям УОЛ не более 0,04". Изменение уровня водохранилища может привести к вариации УОЛ до 0,2" при выполнении наблюдений в непосредственной близости.

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ И ОПЕРАТИВНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ С АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯМИ

3.1 Введение

Как было отмечено выше, при известных астрономических и геодезических координатах в точке измерений составляющие УОЛ находятся по формулам (2). Составляющие УОЛ можно найти также и при известных значениях компонент вектора силы тяжести \mathbf{g} [113]:

$$\xi = -\arcsin\left(\frac{g_x}{|\mathbf{g}|}\right), \quad \eta = -\arcsin\left(\frac{g_y}{|\mathbf{g}|}\right). \quad (33)$$

Знак минус означает, что УОЛ в сторону возрастания координат считается отрицательным.

Нормируем вектор силы тяжести в виде $\frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} = \mathbf{n}$. При этом компоненты единичного вектора \mathbf{n} будут выглядеть следующим образом:

$$\mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ \sqrt{1-n_x^2-n_y^2} \end{pmatrix}, \quad (34)$$

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

С учетом этого формула (33) примет вид:

$$\begin{aligned} \xi &= -\arcsin(n_x), \\ \eta &= -\arcsin(n_y). \end{aligned} \quad (35)$$

Таким образом, определение значений составляющих УОЛ в этом случае сводится к вычислению компонент единичного вектора \mathbf{n} .

3.2 Определение всех параметров астроизмерителя

Основными составными элементами астроизмерителя являются телескоп, ПЗС-камера, инклинометр и ГНСС-приемник. Данными измерений с астроизмерителем в каждом положении телескопа являются:

- 1) кадр звездного неба;
- 2) геодезические координаты местоположения;
- 3) время экспозиции кадра звездного неба;
- 4) текущий угол наклона телескопа по показаниям инклинометра по двум осям;
- 5) температура, которую можно определить, например, по встроенному датчику температуры в инклинометр.

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 относительное угловое расположение плоскостей ПЗС-сенсора и инклинометра неизвестно. Для выполнения совместной обработки данных измерений с ПЗС-камеры и инклинометра необходимо определить углы взаимной ориентации между их приборными системами координат. Взаимное расположение осей систем координат инклинометра и ПЗС-камеры можно характеризовать тремя углами Эйлера φ, θ, ψ . Три угла Эйлера однозначно определяют поворот одной системы координат относительно другой [15].

2. Инклинометр показывает текущий наклон телескопа относительно отвесной линии. При этом необходимо расположить оси инклинометра под углом 90° друг к другу для выполнения измерений по двум перпендикулярным осям OX и OY . К тому же необходимо определить масштабные коэффициенты для каждой оси инклинометра. Т.е. неизвестными параметрами инклинометра являются масштабные коэффициенты m_x и m_y (по осям OX и OY) и угол расположения (угол скрещивания) осей инклинометра ε .

3. При выполнении измерений с астроизмерителем температура окружающей среды может изменяться в течение времени наблюдений. Изменение температуры ΔT 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 φ, θ, ψ ;
- масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра m_x, m_y, ε ;
- 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. В связи с этим необходимо определить параметры ориентации (матрицу ориентации) ПЗС-сенсора (обозначим эту матрицу A) в топоцентрической горизонтальной системе координат (будем называть ее местной СК). Матрицу A можно вычислить на основе данных о параметрах ПЗС-сенсора, полученного кадра звездного неба, звездного каталога, информации о времени экспозиции кадра звездного неба и геодезических координат местоположения (см. п. 3.3).

5. Будем предполагать, что вектор силы тяжести \mathbf{g} в местной СК нормирован в соответствии с (34).

6. Инклинометр определяет текущие углы наклона телескопа относительно отвесной линии. Обозначим показания инклинометра (два угла по осям OX и OY) $inclX$ и $inclY$.

7) Встроенный датчик температуры в инклинометре позволяет определить изменения температуры ΔT за время измерений.

Таким образом, параметрами, характеризующими астроизмеритель, являются:

а) *измеряемые и вычисляемые параметры:*

- матрица A , определяющая ориентацию ПЗС-сенсора в местной СК;
- показания инклинометра по двум осям $inclX, inclY$,
- изменение температуры за время наблюдений ΔT .

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

- углы взаимной ориентации осей ПЗС-камеры и инклинометра φ, θ, ψ ;
- масштабные коэффициенты и угол скрещивания осей инклинометра m_x, m_y, ε ;
- 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:

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

3.3 Вычисление всех параметров астроизмерителя

В предыдущем разделе определены все параметры – измеряемые, вычисляемые и неизвестные при наблюдениях с астроизмерителем. Рассмотрим формулы, которые позволяют определять неизвестные и вычисляемые параметры:

1. Определить углы φ, θ, ψ взаимной ориентации осей инклинометра и ПЗС-сенсора можно с использованием матриц поворота вокруг осей OX, OY и OZ . Они выглядят следующим способом [15]:

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

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

$$R = R_z(\varphi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi). \quad (36)$$

2. Масштабные коэффициенты m_x, m_y и угол скрещивания осей инклинометра ε можно вычислить на основе использования матрицы вида:

$$M = \begin{pmatrix} m_x \sin \varepsilon & m_x \sin \varepsilon & 0 \\ 0 & m_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (37)$$

3. Для оценки температурных коэффициентов осей инклинометра k_x и 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):

$$\begin{aligned} inclX &= inclX' + k_x(T_{end} - T_0), \\ inclY &= inclY' + k_y(T_{end} - T_0), \end{aligned} \quad (38)$$

где k_x, k_y – температурные коэффициенты;

$inclX', inclY'$ – начальные показания инклинометра без учета 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 учетом смещений из-за температуры.

4. Определим параметры матрицы ориентации ПЗС-камеры A в местной СК. Для этого выполним следующие действия:

1. Для звезд из звездного каталога, средние координаты которых представлены в СК ICRS, определим наблюдаемые координаты - прямое восхождение α и склонение δ с учетом всех значимых факторов (годовая и суточная абберации, прецессия и нутация Земли, гравитационное искривление све-

та и т.д.) в СК CIRS [114]. Вычислим матрицу поворота из СК ПЗС-сенсора в СК CIRS путем получения значений направляющих единичных векторов, связанных с плоскостью ПЗС-сенсора. При этом производятся следующие операции:

– вектор ez имеет координаты в СК CIRS, полученные прямым пересчетом направляющего вектора, соответствующего опорной точке кадра, из сферических координат в декартовые координаты:

$$\begin{pmatrix} ez_x \\ ez_y \\ ez_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}; \quad (39)$$

– вычисляется вспомогательный вектор el , который является направляющим вектором, лежащим в плоскости, перпендикулярной плоскости ПЗС-сенсора и проходящей через ось OX плоскости ПЗС-сенсора. Для этого находят координаты α , δ , соответствующие точке (длина/2, ширина) ПЗС-сенсора, и производится пересчет этих α , δ из сферической СК в декартовую СК;

– вектор ex вычисляется следующим образом:

$$\vec{ex} = \vec{el} - \vec{ez} \cdot (\vec{el} \cdot \vec{ez}). \quad (40)$$

Вектор ex нормируется на 1;

– вектор ey вычисляется как векторное произведение:

$$\vec{ey} = [\vec{ez} \times \vec{ex}]. \quad (41)$$

Матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в СК CIRS имеет вид:

$$SENSORtoCIRS = \|\vec{ex} \ \vec{ey} \ \vec{ez}\|. \quad (42)$$

2. Вычислим матрицу перехода из СК CIRS в СК ITRS (обозначим эту матрицу как $CIRStoITRS$) с учетом времени экспозиции кадра звездного неба, информации о движении полюса и поправок ко времени, полученных из бюллетеней IERS [43]. Данная матрица вычисляется на основе использования библиотеки SOFA [85].

3. Вычислим матрицу поворота из СК ITRS в местную СК ($ITRStoNWU$) [115]:

$$ITRStoNWU = \begin{pmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \sin L & -\cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix}, \quad (43)$$

где B, L – геодезическая широта и долгота.

4. Матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в местную СК вычисляется на основе перемножения вычисленных выше трех матриц:

$$A = ITRStoNWU \times CIRStoITRS \times SENSORtoCIRS. \quad (44)$$

3.4 Модель предлагаемого метода

Итого, с учетом вышесказанного можно записать следующую функциональную зависимость между неизвестными и измеряемыми (вычисляемыми) параметрами астроизмерителя:

$$\left(M(m_x, m_y, \varepsilon), R(\varphi, \theta, \psi), k(k_x, k_y), n_x, n_y \right) = f(A, \Delta T, inclX_i, inclY_i), \quad (45)$$

где $i = 1, \dots, N$, $N \geq 10$ – количество измерений (количество стационарных положений телескопа;

M – матрица для оценки параметров инклинометра (37);

R – матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в СК инклинометра (36);

A – матрица ориентации ПЗС-сенсора в местной СК (44);

n_x, n_y – компоненты нормированного вектора силы тяжести в местной СК (34);

$k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix}$ – температурные коэффициенты по осям инклинометра;

ΔT – изменение температуры относительно опорного значения.

С учетом (45) модель нового метода измерений можно записать в следующем виде [116]:

Нелинейная оптимизация запускается с начальными значениями:

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

Оптимизация производится методом наименьших квадратов с использованием метода Марквардта-Левенберга с численным вычислением производных [117,118]. При этом происходит одновременная оценка всех параметров модели, т.е. происходит «автокалибровка» астроизмерителя в каждой серии. После оценки искомым значений n_x, n_y , составляющие УОЛ по широте и по долготе вычисляются в соответствии с (35).

Таким образом, новый метод измерений с астроизмерителем предполагает получение кадров звездного 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. Важным условием измерений является отсутствие воздействий на астроизмеритель (дуновение ветра, облако на небе и др.) при непосредственной записи показаний инклинометра и кадра звездного неба в каждом отдельном стационарном положении.

Пример практической реализации нового метода представлен на рисунке 14.

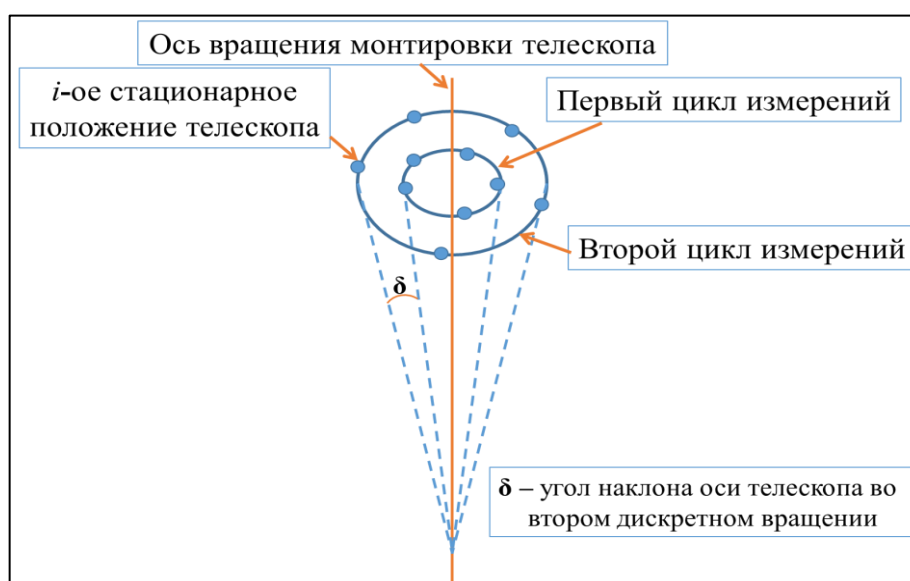


Рисунок 14. Пример практической реализации нового метода измерений

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 «нулевым» зенитным углом (первый цикл наблюдений) и с зенитным углом δ , установленным пользователем (второй цикл наблюдений). Оператором должен задаваться зенитный угол, не выходящий за диапазон измерений инклинометра. Под «нулевым» зенитным углом понимается состояние изначального выравнивания астроизмерителя в горизонтальной плоскости по показаниям инклинометра.

Основным требованием достоверности измерений с новым методом является жесткость системы телескоп – ПЗС-камера – инклинометр. От точностных характеристик вращающего устройства точность итоговых значений УОЛ не зависят.

3.5 Алгоритм, реализующий новый метод измерений

Рассмотрим алгоритм нового метода (рисунок 15).

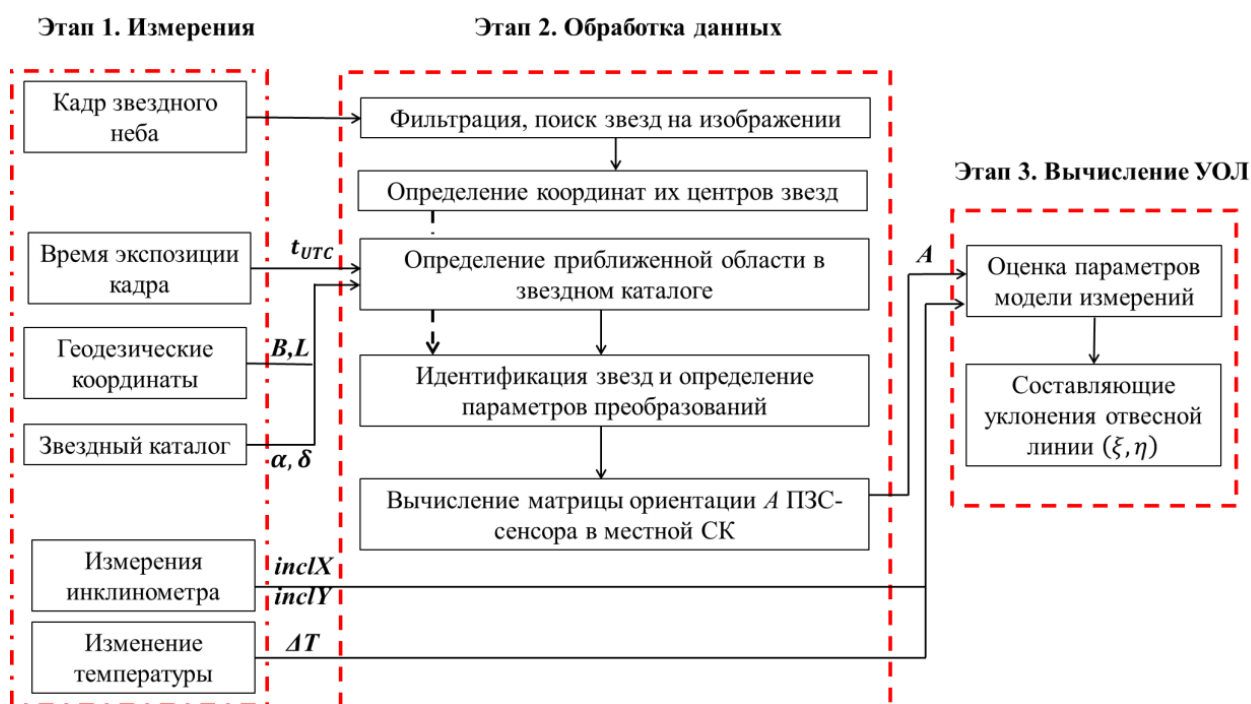


Рисунок 15. Алгоритм нового метода измерений с астроизмерителем

Алгоритм нового метода включает 3 этапа:

1) *Измерения*: получение кадра звездного неба, определение времени экспозиции, определение текущего наклона телескопа, измерение температуры и определение геодезических координат в каждом i -ом стационарном положении телескопа. При этом заранее известны данные звездного каталога, поправки ко времени из бюллетеней IERS и координаты полюса;

2) *Обработка данных*: нахождение звезд на изображении и определение координат их центров, идентификация звезд, определение параметров преобразований и вычисление матрицы ориентации A для всех кадров звездного неба;

3) *Вычисление УОЛ*: оценка параметров модели измерений в соответствии с (46) и вычисление значений составляющих УОЛ в соответствии с (34).

Предлагаемый метод основан на том же инструментальном составе, однако используется следующая последовательность операций:

1) Перед первым циклом наблюдений предварительно выставляют строительную ось трубы телескопа относительно оси вращения монтировки в горизонтальной плоскости («нулевой» зенитный угол).

2) Проводят первый цикл наблюдений звездного неба в 5 стационарных положениях телескопа и более при вращении его монтировки вокруг вертикальной оси.

3) В каждом положении телескопа первого цикла наблюдений снимают кадр изображения звездного неба, записывают текущий наклон телескопа, время экспозиции кадра звездного неба и геодезические координаты.

4) Наклоняют строительную ось трубы телескопа относительно изначального положения на угол δ . При этом угол δ должен находиться в диапазоне измерений инклинометра.

5) Проводят второй цикл наблюдений звездного в 5 стационарных положениях телескопа и более при вращении его монтировки вокруг вертикальной оси.

6) В каждом положении телескопа второго цикла наблюдений снимают кадр изображения звездного неба, записывают текущий наклон телескопа, время экспозиции кадра звездного 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 звездного неба определяют пиксельные координаты звезд x , y в кадре. Затем выполняют идентификацию звезд из изображения с использованием звездного каталога и определяют параметры преобразований между пиксельными координатами x , y звезд из каталога и экваториальными координатами α , δ звезд из каталога, с использованием которых осуществляется преобразование координат центра кадра (ПЗС-сенсора) в экваториальные координаты. Затем определяют матрицу поворота A из местной СК в СК ПЗС-сенсора (44).

8. После обработки данных измерений единичной серии формируется целевая функция, зависящая от 10 неизвестных параметров модели (47), минимизация которой позволяет оценить искомые значения компонент нормированного вектора силы тяжести и текущие значения составляющих УОЛ.

3.6 Преимущества предложенного метода

Предложенный метод обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционным методом:

1. В каждой серии измерений происходит одновременное оценивание и учет всех калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит «автокалибровка» прибора. Это позволяет избежать дополнительных погрешностей, вызванных изменением калибровочных коэффициентов между сериями измерений.

2. Процесс «автокалибровки» астроизмерителя повышает оперативность измерений УОЛ в силу отсутствия необходимости определения калибровочных коэффициентов перед началом измерений.

3. 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.

4. Измерения можно выполнять на любых грунтовых, асфальтовых и бетонных основаниях и площадках. Это особенно важно при измерениях в полевых условиях.

3.7 Условия применения предложенного метода

Для применения предложенного метода необходимы следующие условия:

- 1) Обеспечение жесткости системы телескоп–ПЗС-камера–инклинометр.
- 2) Вращение телескопа, ПЗС-камеры и инклинометра вокруг оси в горизонтальной плоскости с заданным количеством шагов в первом цикле измерений (количество поворотов в горизонтальной плоскости не менее 5).
- 3) Наклон оси телескопа относительно оси вращения на заданный угол (не выходящий за пределы измерений инклинометра).
- 4) Вращение телескопа, ПЗС-камеры и инклинометра вокруг оси в горизонтальной плоскости с заданным количеством шагов во втором цикле измерений (количество поворотов в горизонтальной плоскости не менее 5).
- 5) Сбор данных в каждом положении только в стационарном состоянии;
- 6) Скорость вращения прибора вокруг оси не должна превышать 9 градусов в секунду для исключения влияния динамики на показания инклинометра.
- 7) Запись нескольких показаний инклинометра в каждом положении при вращении прибора вокруг оси до и после экспонирования кадра звездного неба для исключения влияния паразитных наклонов, вызванных, например, «человеческим фактором» (оператор слишком близко подошел), влиянием ветра и др.
- 8) Высокоточная синхронизация измерений со шкалой времени UTC по секундному электрическому сигналу 1 импульс/с (1 pps) от ГНСС-приемника.
- 9) Синхронизация часов компьютера со шкалой времени UTC с помощью сервиса точного времени (NTP).

3.8 Операции, выполняемые в соответствии с предложенным методом

В п. 3.4 определены условия применения предложенного метода. При этом, процесс вычислений УОЛ состоит из двух отдельных этапов: сбора и обработки данных.

3.8.1 Процесс сбора данных

Процесс сбора данных в каждом положении при вращении прибора состоит из следующих этапов:

1) записываются несколько (3-5) последовательных показаний инклинометра в i -ом стационарном положении телескопа;

2) производится экспонирование кадра звездного неба по секундному электрическому сигналу 1 импульс/с (1 pps) от ГНСС-приемника с установленными параметрами;

3) записываются несколько (3-5) показаний инклинометра после окончания экспонирования кадра звездного неба;

4) полученные кадры звездного неба вместе со всей сопровождающей информацией (геодезические координаты местоположения, время экспозиции кадра звездного неба, длительность экспозиции, параметры ПЗС-сенсора, показания инклинометра) сохраняются в формате FITS [119] для последующей обработки;

5) пункты 1-4 повторяются для всех стационарных положений телескопа (общее количество положений телескопа не менее 10).

На протяжении всего процесса измерений часы компьютера должны быть синхронизированы с помощью сервиса NTP со шкалой времени UTC. При этом в качестве источника NTP сервера может служить ГНСС-приемник.

3.8.2 Процесс обработки данных

После окончания процесса сбора данных начинается процесс обработки, который состоит из следующих этапов:

1) чтение FITS-файлов вместе с заголовками, содержащими сопроводительную информацию;

2) проверка разброса показаний инклинометра. Если для данного кадра все записанные показания инклинометра не укладываются в установленный диапазон разброса, такой кадр отбрасывается как недостоверный (это может быть вызвано сильным ветром, вибрацией и другими причинами);

3) фильтрация кадра с целью выделения изображений звезд и определения их пиксельных координат в кадре;

4) чтение звездного каталога и выборка звезд, соответствующих текущему полю зрения телескопа;

5) идентификация выделенных в кадре звезд со звездами из звездного каталога;

6) если количество идентифицированных звезд меньше установленного порога (< 30), такой кадр отбрасывается как недостоверный (это может быть вызвано плохими астроклиматическими условиями или плохой фокусировкой телескопа);

7) производится вычисление матрицы поворота из СК ПЗС-сенсора в СК CIRS;

8) с использованием точного времени наблюдения и положения наблюдателя производится вычисление матрицы поворота из СК ПЗС-сенсора в местную СК;

9) пункты 1-8 повторяются для каждого кадра и полученные матрицы ориентации вместе с усредненными показаниями инклинометра сохраняются в соответствующих массивах измерений.

10) решение целевой функции модели измерений и оценка калибровочных коэффициентов астроизмерителя и текущих значений УОЛ.

3.9 Выводы по главе 3

В главе приведено описание нового предложенного метода измерений УОЛ с астроизмерителем. Особенностью предлагаемого метода является то, что он позволяет учитывать изменение калибровочных коэффициентов астроизмерителя между сериями измерений за счет свойства «автокалибровки». Новый метод предполагает получение кадров звездного неба и значений показаний инклинометра 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. Предложенный метод измерений не требует устройства специального жесткого измерительного бетонного основания и высокоточного измерения угла поворота телескопа в горизонтальной плоскости.

В связи с этим преимущества разработанного метода состоят в следующем:

1. В каждой серии измерений происходит одновременное оценивание и учет всех калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит «автокалибровка» прибора. Это позволяет избежать дополнительных погрешностей, вызванных изменением калибровочных коэффициентов между сериями измерений.

2. Процесс «автокалибровки» астроизмерителя повышает оперативность измерений УОЛ в силу отсутствия необходимости определения калибровочных коэффициентов перед началом измерений в каждой точке.

3. 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.

4. Снимаются требования к обеспечению жесткости основания, на котором размещается астроизмеритель. Это позволяет выполнять наблюдения на любом неподготовленном твердом основании (грунтовые, асфальтовые дороги и площадки). Это особенно важно при измерениях в полевых условиях.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ УОЛ НА АСТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОМ ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СТЕНДЕ (МАКЕТЕ АСТРОИЗМЕРИТЕЛЯ)

4.1 Программно-математическая модель астроизмерителя для моделирования разработанного метода

4.1.1 Назначение и состав программно-математической модели астроизмерителя

Для моделирования, отработки и подтверждения работоспособности алгоритмов разработанного метода была создана программно-математическая модель (ПММ) астроизмерителя. Она предназначена для решения следующих основных частных задач:

- а) моделирование кадра звездного неба;
- б) моделирование работы инклинометра;
- в) моделирование работы ГНСС-приемника в части временной привязки;
- г) обработка данных моделирования.

В дальнейшем эти данные могут быть использованы для тестирования, отладки и верификации алгоритмов обработки, которые на основании натуральных измерений должны обеспечить правильность вычисляемых значений УОЛ, т.е. ПММ позволила в лабораторных условиях отладить алгоритмы разработанного метода измерений УОЛ с астроизмерителем, что позволило внедрить их при непосредственных испытаниях в условиях реального звездного неба.

Блок-схема ПММ астроизмерителя включает 4 блока (рисунок 16):

- «Блок входных данных» предназначен для задания входных параметров для работы ПММ;
- «Блок моделирования отдельных элементов астроизмерителя» предназначен для моделирования отдельных элементов;

– «Блок выходных данных моделирования» предназначен для выдачи выходного изображения звездного неба, результатов работы инклинометра и ГНСС-приемника;

– «Блок обработки данных моделирования» предназначен для обработки данных моделирования.

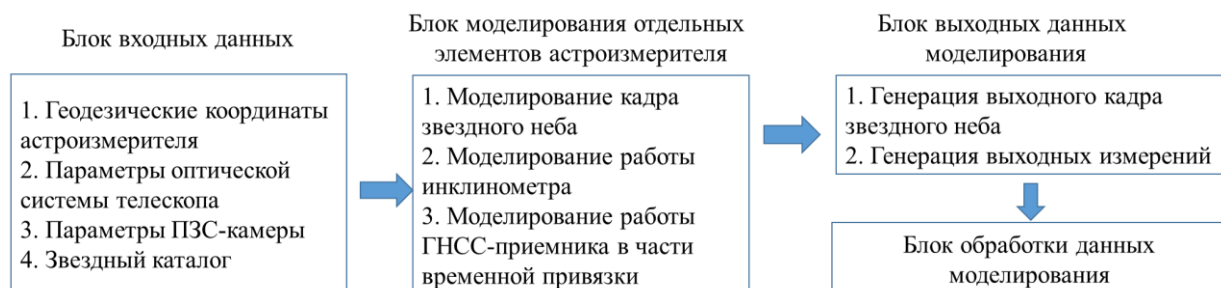


Рисунок 16. Блок-схема ПММ астроизмерителя

Рассмотрим элементы ПММ более подробно.

4.1.2 Задачи, решаемые программно-математической моделью астроизмерителя

4.1.2.1 Моделирование кадра звездного неба

ПММ позволяет оценить качество и информативность изображений с астроизмерителем, получаемых при разных временах экспозиции, различных типах оптической системы, параметров ПЗС-камеры и времен съемки. Это позволит определить минимальные требования к составным элементам астроизмерителя, а именно:

- к телескопу (диаметр апертуры и фокусное расстояние);
- к ПЗС-камере (размер матрицы, размер пикселя, квантовый выход);
- к времени экспозиции кадра звездного неба.

Рассмотрим более подробно некоторые особенности ПММ.

Вычисление направления монтировки телескопа в геоцентрической небесной системе координат (GCRS) (прямое восхождение и склонение) и поворота изображения в поле зрения

Для определения ориентации оптической оси требуется определить матрицу поворота из системы координат, связанной с плоскостью и направлением нормали ПЗС-сенсора, в систему GCRS, то есть в неподвижную геоцентрическую систему отсчета.

Для этого выполняются следующие действия:

1. Вычисляется матрица поворота M_1 из СК ПЗС-сенсора в СК, связанная с оптической трубой.

Пусть при вращении оптической трубы относительно ее продольной оси, изображение на ПЗС-сенсоре поворачивается относительно точки с пиксельными координатами x_0, y_0 . Будем называть эту точку опорной. Координаты этой точки обозначим α, γ и вычислим как:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{x_0}{y_0}\right), \quad \gamma = \mu \cdot \sqrt{\left(\left(\frac{L}{2} - x_0\right)^2 + \left(\frac{W}{2} - y_0\right)^2\right)}, \quad (46)$$

где μ – угловое разрешение, рад/пиксель;

L – длина ПЗС-сенсора в пикселях;

W – ширина ПЗС-сенсора в пикселях.

Тогда искомая матрица определяется как:

$$M_1 = R_3(-\delta - \alpha) \cdot R_2(-\gamma) R_3(-\alpha), \quad (47)$$

где δ – угол поворота оси OX ПЗС-сенсора относительно оси поворота оптической трубы по углу места;

R_2, R_3 – матрицы поворота вокруг осей OY и OZ .

2. Вычисляется матрица поворота M_2 монтировки телескопа по азимуту Az и зенитному углу Ze :

$$M_2 = R_3(Az) \cdot R_2(Ze). \quad (48)$$

3. Вычисляется матрица поворота M_3 основания монтировки относительно местной вертикали и направления на север. Она определяется тремя углами Эйлера φ, θ, ψ :

$$M_3 = R_3(\varphi) \cdot R_1(\theta) \cdot R_3(\psi), \quad (49)$$

где R_l – матрица поворота вокруг оси OX .

4. Вычисляется матрица поворота M_4 из СК, где ось OZ направлена по местной вертикали вверх, ось OX – на север, в СК, где ось OZ направлена вдоль оси Земли, а OX – вдоль нулевого меридиана. Матрица имеет вид:

$$M_4 = \begin{pmatrix} -\sin(F)\cos(L) & -\sin(F)\sin(L) & \cos(F) \\ \sin(L) & -\cos(L) & 0 \\ \cos(F)\cos(L) & \cos(F)\sin(L) & \sin(F) \end{pmatrix}, \quad (50)$$

где F, L – геодезические координаты - широта и долгота, рад.

5. Вычисляется матрица поворота M_5 из СК ITRS в СК GCRS, то есть из подвижной системы, связанной с вращающейся Землей, в неподвижную систему. Она задается датой (эпохой) наблюдения, смещением полюса Земли x_p, y_p , сдвигом времени TT-UT1. Определяется как комбинация матриц прецессии, нутации и смещения полюса. Данные матрицы вычисляются на основе моделей вращения Земли с использованием библиотеки NOVAS [35].

После того, как определены матрицы M_1, M_2, M_3, M_4 и M_5 , вычисляется направление оптической оси телескопа в неподвижной сферической системе координат в момент экспозиции кадра звездного неба (прямое восхождение и склонение). Используя это направление, поворот относительно опорной точки, а также угловое разрешение, моделируется изображение звездного неба с использованием звездного каталога.

Выбор необходимых звезд из звездного каталога

Для корректного отображения звезд при моделировании необходимо осуществить выбор нужных звезд из звездного каталога. Для этого требуется знать направление оптической оси телескопа в системе координат GCRS (углы прямого

восхождения и склонения) и поле зрения, которое зависит от фокусного расстояния телескопа и размеров ПЗС-сенсора. Зная фокусное расстояние и размер ПЗС-сенсора, производится вычисление поля зрения телескопа. Затем при чтении звездного каталога выбираются те звезды, которые попадают в поле зрения телескопа при его текущей ориентации и далее они подаются на вход блока генерации изображения звезд.

Вычисление коэффициента чувствительности

Для корректного отображения звезд при моделировании необходимо знать коэффициент пересчета звездной величины звезды из каталога в единицы АЦП ПЗС-сенсора. Коэффициент пересчета определяется следующим образом:

$$K = \frac{10^6 \cdot 2^n \cdot \pi \cdot R^2 \cdot T_{\text{exp}} \cdot Q}{C}, \quad (51)$$

где n – разрядность АЦП;

R – радиус апертуры, см;

T_{exp} – время выдержки, с;

Q – квантовая эффективность, электрон/квант;

C – емкость элемента матрицы, шт. электронов;

10^6 – это число квантов, падающих на 1 см^2 площади за 1 с при излучении источником с нулевой звездной величиной.

Формула для вычисления значения яркости на матрице в итоге получается следующей:

$$A = 10^{\frac{M}{2.5}} \cdot K, \quad (52)$$

где M – относительная звездная величина;

K – коэффициент пропорциональности, вычисленный выше.

Моделирование изображений звезд

Входными данными для моделирования изображений звезд являются следующие параметры:

– координаты звезды в абсолютной сферической системе координат (прямое восхождение и склонение);

– относительная яркость звезды (звездная величина) в фильтре V (визуальная звездная величина);

– собственное движение звезды (движение звезды относительно координат, указанных на определенную эпоху, обычно указываются координаты на эпоху J2000).

Эти параметры содержатся в звездном каталоге.

Помимо звездного каталога, для создания корректного кадра звездного неба необходимы параметры оптической системы и ПЗС-сенсора:

– положение наблюдателя;

– параметры оптической системы (размер апертуры, поле зрения, фокусное расстояние);

– параметры ПЗС-сенсора (разрешение ПЗС-сенсора, разрядность АЦП, квантовый выход, емкость ячейки, параметры темнового тока и шума дискретизации);

– параметры съемки (время съемки, выдержка).

Правильный учет данных параметров позволяет получить правильные кадры звездного фона.

Пересчет из сферических координат (углы прямого восхождения и склонения) в декартовы координаты на ПЗС-сенсоре производится следующим образом. Вычисляется угловое расстояние и направление между направлением оптической оси и координатами звезды:

$$st = \frac{\pi}{2} - \arcsin(\sin(F_1) \cdot \sin(F_2) + \cos(F_1) \cdot \cos(F_2) \cdot \cos(L_1 - L_2)),$$
$$at = \arcsin\left(\sin(L_1 - L_2) \cdot \frac{\sin(F_1) \cdot \sin(F_2) + \cos(F_1) \cdot \cos(F_2) \cdot \cos(L_1 - L_2)}{\sin(st)}\right), \quad (53)$$

где st – угловое расстояние;

at – направление из (F_1, L_1) в (F_2, L_2) ;

F_1 и F_2 – соответственно склонения оптической оси телескопа и звезды;

L_1 и L_2 – прямые восхождения оптической оси телескопа и звезды.

Далее производится перевод в прямоугольную систему координат матрицы:

$$\begin{aligned}x &= k \cdot st \cdot \sin(at), \\y &= k \cdot st \cdot \cos(at),\end{aligned}\tag{54}$$

где k – масштабный коэффициент, определяющий число пикселей ПЗС-сенсора в одном радиане.

Форма звезды моделируется с использованием суммы двух функций Гаусса (функция рассеяния точки (ФРТ)). При этом дисперсия ФРТ полагается постоянной по кадру, искажения отсутствуют. Профиль звезды задается формулой:

$$F(x, y) = A \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{s_1^2} \right)} + A \cdot \frac{1}{3 \cdot \pi} \cdot e^{-0.5 \cdot \left(\frac{(x-x_c)^2 + (y-y_c)^2}{s_2^2} \right)},\tag{55}$$

где $s_1=0,465 \cdot s$, $s_2=2 \cdot s$; s – дисперсия ФРТ; x_c и y_c – координаты центра кадра.

На рисунке 17 представлен пример кадра звездного неба.

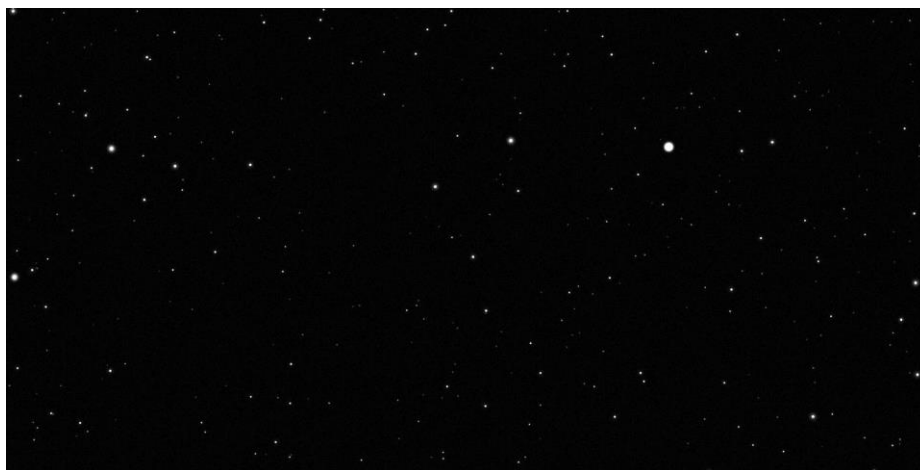


Рисунок 17. Пример модельного кадра со звездами

Генерирование шума

К полученному в результате моделирования кадру звездного неба добавляется гауссовский шум, задаваемый дисперсией, выраженной в единицах АЦП. На рисунке 18 представлен пример смоделированного кадра звездного неба с шумом.



Рисунок 18. Пример кадра звездного неба с шумом с дисперсией 30 единиц АЦП

4.1.2.2 Формат выходных данных

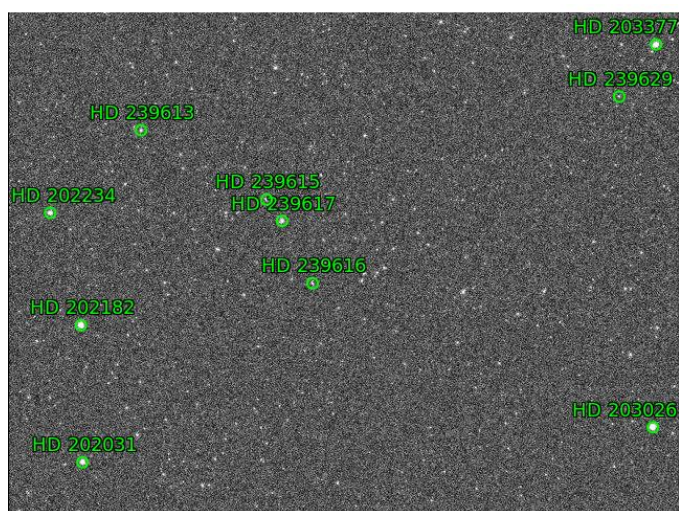
В процессе моделирования все результаты сохраняются в формате FITS: смоделированный кадр звездного неба и вспомогательная информация – время экспозиции в шкале UTC, геодезические координаты местоположения, параметры ПЗС-сенсора, смоделированные показания инклинометра.

4.1.3 Моделирование разработанного метода измерений УОЛ

4.1.3.1 Проверка смоделированных кадров звездного неба

Пример смоделированного кадра звездного неба представлен на рисунке 18. Одним из главных критериев проверки правильности смоделированных кадров является их привязка к звездному каталогу. Для проверки привязки смоделированных кадров использовалось независимое программно-математическое обеспечение Astrometry [120]. Данный программный продукт используется удаленно через Интернет. После загрузки звездных кадров на сервер, программа автоматически обрабатывает кадры и выполняет процесс привязки кадра к звездному каталогу. Успешная привязка кадра к звездному каталогу является залогом правильности используемых алгоритмов для моделирования кадра звездного неба. Пример привязки смоделированного кадра к звездному каталогу с использованием программного обеспечения Astrometry показан на рисунке 19. Проведены исследования с более чем 50 смоделированными кадрами, результаты которых показали,

что смоделированные кадры звездного неба привязываются к звездному каталогу без ошибок. Таким образом, используемые алгоритмы для моделирования кадра звездного неба в ПММ АУОЛ являются правильными и работоспособными.



Зеленым кружками выделены идентифицированные звезды. Обозначения возле звезд – это номера идентифицированных звезд в звездном каталоге HD

Рисунок 19. Пример привязки смоделированного кадра к звездному каталогу

4.1.3.2 Результаты моделирования метода

Было проведено моделирование нового метода измерений с входными параметрами, приведенными в таблице 12.

Таблица 12. Входные параметры для моделирования измерений астроизмерителя

Параметр	Значение
Параметры телескопа:	
– апертура, мм	200
– фокусное расстояние	1260
Параметры ПЗС-сенсора:	
– разрешение матрицы, пиксели	1500x1500
– размер пикселя, мкм	9
– квантовый выход	0,6
– время экспозиции, с	0,5
Геодезические координаты местоположения:	
– широта, градусы	56
– долгота, градусы	37
– высота, м	200
Значения составляющих УОЛ:	
– УОЛ по широте	2"
– УОЛ по долготе	-5"

Полученные в результате моделирования измерения затем были загружены в блок обработки данных моделирования. Результаты обработки приведены в таблице 13.

Таблица 13. Результаты обработки смоделированных измерений астроизмерителя

Параметр	Значение
Среднее количество идентифицированных звезд в кадре, шт.	200
Средняя невязка привязки кадра к звездному каталогу	0,05"
Вычисленные значения составляющих УОЛ:	
– УОЛ по широте	1,98"
– УОЛ по долготе	-5,02"
Невязка решения	0,15"

Таким образом, результаты моделирования ПММ астроизмерителя показали работоспособность алгоритмов разработанного метода. К тому же, ПММ позволило отладить алгоритмы разработанного метода для непосредственного дальнейшего испытания в условиях реального звездного неба.

4.2 Создание астроизмерительного испытательного стенда на основе действующего макета астроизмерителя уклонений отвесной линии (АУОЛ)

4.2.1 Общие сведения

Для исследования разработанного метода в условиях реального звездного неба был создан астроизмерительный испытательный стенд на основе макета астроизмерителя УОЛ.

4.2.2 Технические характеристики известных реализаций астроизмерителей

В таблице 14 приведены основные характеристики известных реализаций астроизмерителей.

Таблица 14. Основные технические характеристики некоторых известных реализаций астроизмерителей

Разработчик	Диаметр телескопа, мм	Фокусное расстояние, мм	Размер ПЗС-сенсора, мм	Размер пикселя ПЗС-сенсора, мкм	Инклинومتر
Университет Ганновера, Германия	200	1020	1530 x 1020	9 x 9	Lippman
Швейцарская высшая техническая школа Цюриха, Швейцария	200	1020	3072 x 2048	9 x 9	Zerotronic
Босфорский университет, Турция	200	2000	2184 x 1510	6,8 x 6,8	Nivel
Институт геодезии и геофизики Венского технического университета, Австрия	50	200	752 x 580	11 x 11	-
Латвийский университет, Латвия	200	2000	3300 x 2500	5,4 x 5,4	Lippman
Китайская национальная астрономическая обсерватория, Китай	200	1180	3072 x 2048	9 x 9	Lippman
ЦНИИ «Электроприбор», Россия	200	1218	5120 x 3840	6,4 x 6,4	Zerotronic

Анализ таблицы 14 показывает, что:

- диаметр телескопа всех высокоточных астроизмерителей составляет не более 200 мм;
- в состав астроизмерителей входят не более трех разновидностей инклинометров;
- размер ПЗС-сенсора и размер пикселя ПЗС-сенсора отличаются существенно друг от друга.

4.2.3 Телескоп стэнда

В состав макета АУОЛ входит телескоп Meade LX200 с автоматизированной монтировкой (ОПУ – опорно-поворотное устройство) (рисунок 20). ОПУ позволяет выполнять вращение телескопа вокруг оси с необходимым количеством шагов в горизонтальной плоскости и наклонять телескоп относительно оси вращения, что является необходимым условием применения предложенного метода (п. 3.4) [121]. Параметры телескопа: диаметр – 203 мм, фокусное расстояние – 2000 мм. Для применения традиционного метода необходимо, чтобы поворотная платформа характеризовалась точностью поворота в горизонтальной плоскости в единицы угловых секунд. Монтировка, которая идет в составе телескопа, имеет

точность вращения $10'$, что неприемлемо для традиционного метода (в астроизмерителе разработки Босфорского университета, которая также использует такую же монтировку, разработчики дорабатывали монтировку). Однако так как предложенный метод не требует точного вращения вокруг оси, этот параметр никак не влияет на результаты измерений.



Рисунок 20. Телескоп Meade LX200 с автоматизированной монтировкой

4.2.4 Инклинометр стенда

Точность измерения наклонов поверхности геоида играет фундаментальную роль в определении направления отвесной линии. В состав макета АУОЛ входит двухосевой высокоточный инклинометр производства компании Leica Nivel 210 с заявленной погрешностью определения текущего наклона $0,6''$ в диапазоне измерений $\pm 300''$.

4.2.5 ПЗС-камера стенда

ПЗС-камера в составе макета астроизмерителя УОЛ должна решать 2 задачи:

– выполнять высокоточную привязку к шкале времени UTC по сигналу внешнего триггера (например, по электрическому сигналу 1 pps от ГНСС-приемника);

– делать качественные кадры звездного неба (отношение сигнал/шум $\gg 1$).

Еще одним важным фактором является размер сенсора ПЗС-камеры, который влияет на поле зрения астроизмерителя. Были проанализированы существующие ПЗС-камеры и с учетом их технических характеристик и характеристик телескопа, было проведено моделирование с ПММ. При этом проводился анализ качества получаемых изображений (явное выделение звезд на фоне шума) и сравнивалось количество идентифицированных звезд в кадре с использованием разных звездных каталогов (Tycho-2, UCAC4 и PPMXL). По результатам моделирования была выбрана ПЗС-камера SBIG STF-8300M (разрешение – 3326x2504; размер пикселей – 5,4x5,4 мкм; пик квантовой эффективности – 56 %). Данная камера имеет вход внешнего триггера, что позволяет выполнять высокоточную привязку к шкале времени UTC.

Размер поля зрения астроизмерителя с учетом характеристик телескопа и ПЗС-камеры составляет 0,19°. Анализ существующих астроизмерителей показал, что обычно в среднем в кадре наблюдается от 80 и более звезд. Результаты моделирования с ПММ показали, что уменьшение фокусного расстояния телескопа приведет к увеличению количества звезд в кадре. Это связано с тем, что уменьшение фокусного расстояния телескопа приводит к увеличению поля зрения. Поэтому было принято решение о необходимости использования редуктора фокуса. С редуктором фокуса с коэффициентом 0,63 поле обзора телескопа увеличивает до 0,53°, что позволяет наблюдать в кадре большее количество звезд (таблица 15).
Таблица 15. Количество звезд из некоторых звездных каталогов при разных полях зрения астроизмерителя

Поле зрения (квадратный градус)/звездный каталог	Tycho-2	UCAC4	PPMXL
0,19	~10	~60	~80
0,53	~50	~180	~200

4.2.6 Повышение эффективности астрономических наблюдений при разных климатических условиях

Специфические метеорологические условия местности при астрономических наблюдениях с телескопом играют существенную роль. Покрытие росой объектива телескопа в весеннее и осеннее время, обмерзание объектива в зимний период, обмерзание или запотевание зеркала внутри оптической трубы, избыточная влажность – все эти факторы могут значительно усложнить процедуру и сократить время наблюдений в достаточно редкие периоды чистого звездного неба, а также ухудшить качество изображений и даже сделать наблюдения невозможными. Поэтому, для исключения влияния приведенных выше факторов (паразитные факторы) и для повышения эффективности наблюдений, необходимо предпринять меры по их устранению их влияния.

В обсерватории «Светлое» ИПА РАН разработано техническое предложение «Антироса» по удалению влаги из составных частей квантово-оптической системы (КОС) «Сажень-ТМ», расположенных на открытом воздухе [122]. Система «Антироса» включает следующие системы:

– *систему удаления влаги с объективов теплым воздухом.* Система выполнена на базе вентиляторов диаметром 70 мм, к корпусу которых крепится нагревательный элемент. Принцип работы основан на обдуве объективов воздухом с повышенной точкой росы от 3 до 4 °С;

– *систему подачи осушенного воздуха внутрь оптических труб.* Система выполнена на базе аквариумного компрессора, патрона осушки от волноводного дегидрататора ДВ5М-220, индикатора влажности и подводящих трубок ПВХ диаметром 6 мм. Влажный воздух, попадая в данную систему, осушается и через тройник поступает во внутреннее пространство объективов через оси, где выдавливает в имеющиеся щели влажный воздух и заполняет объем труб сухим и очищенным воздухом;

– *систему осушения воздуха в подкупольном пространстве при закрытом куполе.* Система включает адсорбционный осушитель воздуха НВ Cotes CR300BT.

Результаты исследований показали, что при автоматической работе системы образование наледи и запотевание не происходит, а при их образовании достаточно до 30 мин работы системы для полной очистки. Однако следует заметить, что система «Антироса» непригодна для полевых условий в силу сложности реализации.

Сотрудниками ФГУП «ВНИИФТРИ» для объективов КОС «Сажень-ТМ» разработана система, которая направлена на устранение приведенных выше паразитных факторов. Для этого на объективы КОС установлены бленды длиной 50 см, внутри которых вблизи оптической системы объективов установлены обогревательные ленты небольшой мощности. Бленда представляет собой полую трубу, устанавливаемую на переднюю часть объектива телескопа. Она создает определенный микроклимат, который препятствует возникновению росы. Наличие бленды ни в коей мере не сказывается на качестве получаемого изображения. Помимо этого, она отсекает паразитную боковую засветку, заметно улучшая контраст изображения.

Таким образом, из анализа существующих методов борьбы с «паразитными» факторами при оптических астрономических наблюдениях следует, что для повышения эффективности наблюдений звездного неба наиболее простым в исполнении и использовании является бленда. При этом предлагается использовать бленду без обогревательных элементов, так как тепловые потоки от обогревательных элементов могут стать источниками искажений в получаемом кадре звездного неба.

4.2.7 Программное обеспечение испытательного стенда

Как было рассмотрено выше в п. 3.5, процесс вычислений УОЛ состоит из этапа сбора данных и обработки результатов наблюдений, т.е. включает два специальных программных обеспечения (СПО) [123]:

- 1) СПО, позволяющее выполнять сбор данных испытательного стенда в каждом положении телескопа с заданными параметрами («Отвес-1»);

2) СПО обработки данных наблюдений («Отвес-2»).

При этом СПО «Отвес-1» разрабатывается непосредственно под конкретные приборы, которые входят в состав испытательного стенда. В то время как, СПО «Отвес-2» не зависит от параметров приборов испытательного стенда.

ПММ астроизмерителя использовалась для отладки СПО «Отвес-2», в которой реализованы алгоритмы разработанного метода, в лабораторных условиях. Это позволило внедрить СПО «Отвес-2» в испытательный стенд и приступить к непосредственным испытаниям метода в условиях реального звездного неба.

4.2.8 Внешний вид испытательного стенда на основе макета астроизмерителя АУОЛ

Общий вид стенда на основе макета АУОЛ представлен на рисунке 21.



Рисунок 21. Общий вид испытательного стенда на основе макета астроизмерителя

Пример кадра звездного неба, полученного при времени экспозиции 0,5 с, показан на рисунке 22.



Рисунок 22. Пример кадра звездного неба, полученного со стендом на основе макета АУОЛ с временем экспозиции 0,5 с

Вывод: анализ рисунка 22 показывает, что звезды в кадре не вытянуты и на фоне шума выделяются явно. Т.е. кадр звездного неба является информативным, что является одним из главных условий измерений с астроизмерителем.

4.2.9 Исследование расположения инклинометра и способа его закрепления

Как было отмечено в п. 3.4, необходимым условием применимости разработанного метода является жесткость системы ПЗС-камера – телескоп – инклинометр. Жесткость системы можно «оценить» по значению невязки при решении уравнения модели (значение невязки должна быть не более 1"). Т.е. этот параметр является «индикатором» достоверности вычисляемых значений УОЛ. Невязка $\gg 1''$ свидетельствует об отсутствии жесткости системы телескоп - инклинометра - ПЗС-камеры, что недопустимо для применения разработанного метода. Пример невязки $\gg 1''$, полученной при проведении первых ночных наблюдений, показан на рисунке 23.

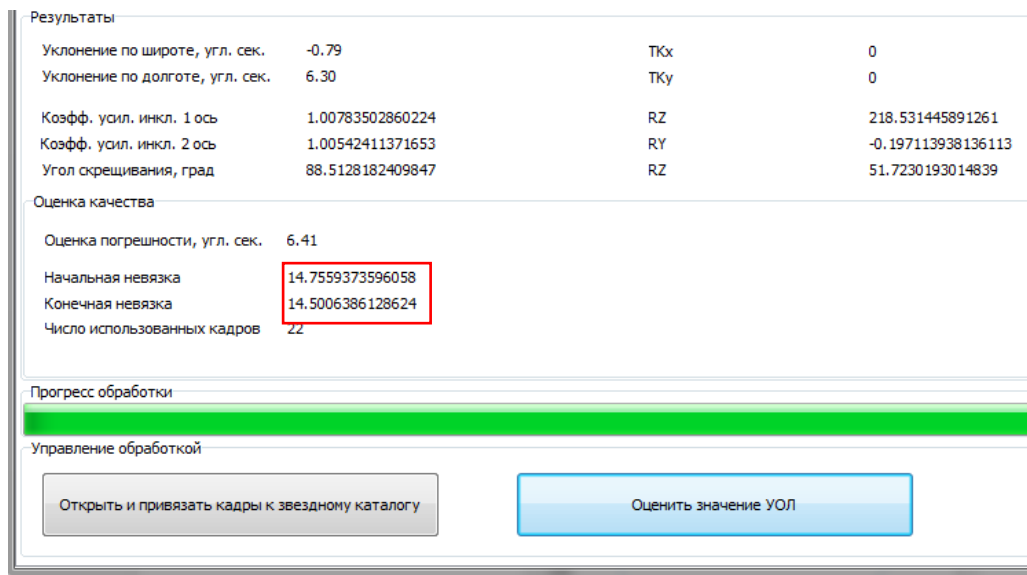


Рисунок 23. Пример большой невязки при вычислении УОЛ (окно программы для обработки результатов наблюдений)

Исследования зависимости показаний инклинометра были выполнены при его размещении на монтировке телескопа и непосредственно на самом телескопе (рисунок 24).

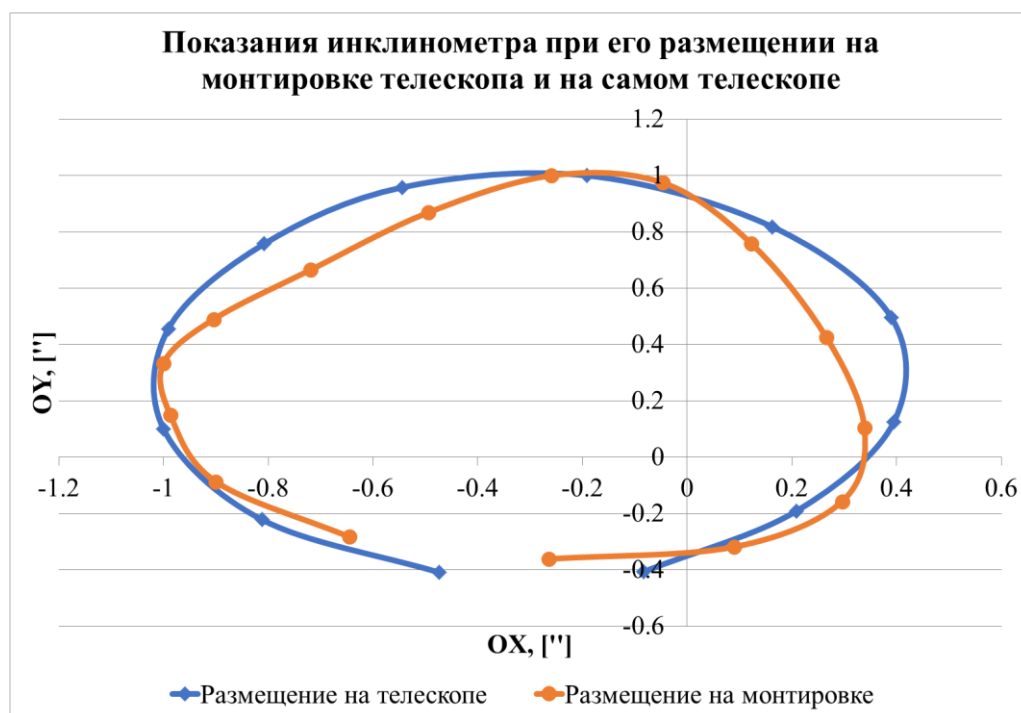


Рисунок 24. Пример показаний инклинометра при его размещении на монтировке телескопа и на самом телескопе (показания нормированы на 1)

Из рисунка видно, что график показаний инклинометра при размещении его на монтировке (желтая линия) «деформирован». Скорее всего, это связано с тем,

что происходит деформация самой монтировки телескопа, что является неприемлемым условием. При размещении инклинометра на телескопе (синяя линия), график показаний инклинометра «не деформирован», что говорит о наличии жесткой связи между телескопом и инклинометром.

Таким образом, на основе исследований выявлено, что для обеспечения жесткости системы необходимо размещение инклинометра непосредственно на телескопе.

4.3 Исследование влияния выбора методов обработки метода измерений на точность значений УОЛ

Как уже отмечалось, на этапе обработки в предложенном методе возможно использование различных методов определения координат центров звезд, различных высокоточных звездных каталогов и различных методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу. Поэтому необходимо провести исследования по оценке влияния выбора методов определения координат центров звезд, высокоточных звездных каталогов и методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу на точность определения итоговых значений УОЛ. Кроме того, необходимо провести независимые исследования по оценке влияния искажений, которые возникают в оптической системе телескопа, на итоговые значения УОЛ: изменений масштабного коэффициента пикселя для реальных кадров звездного неба и влияние выбора полинома на точность привязки кадра звездного неба к звездному каталогу.

4.3.1 Исследование влияния изменения масштабного коэффициента пикселя на точность измерений УОЛ

Как было отмечено в п. 2.5, оценку величин искажений в оптической системе телескопа можно сделать разными способами. Рассмотрим первый способ – исследование изменения масштабного коэффициента пикселя m .

Для исследования зависимости значения m по кадру звездного неба использовались различные наборы пар звезд в кадре звездного неба: все пары звезд, пары звезд вблизи центра кадра и пары звезд на «периферии» (рисунок 25).

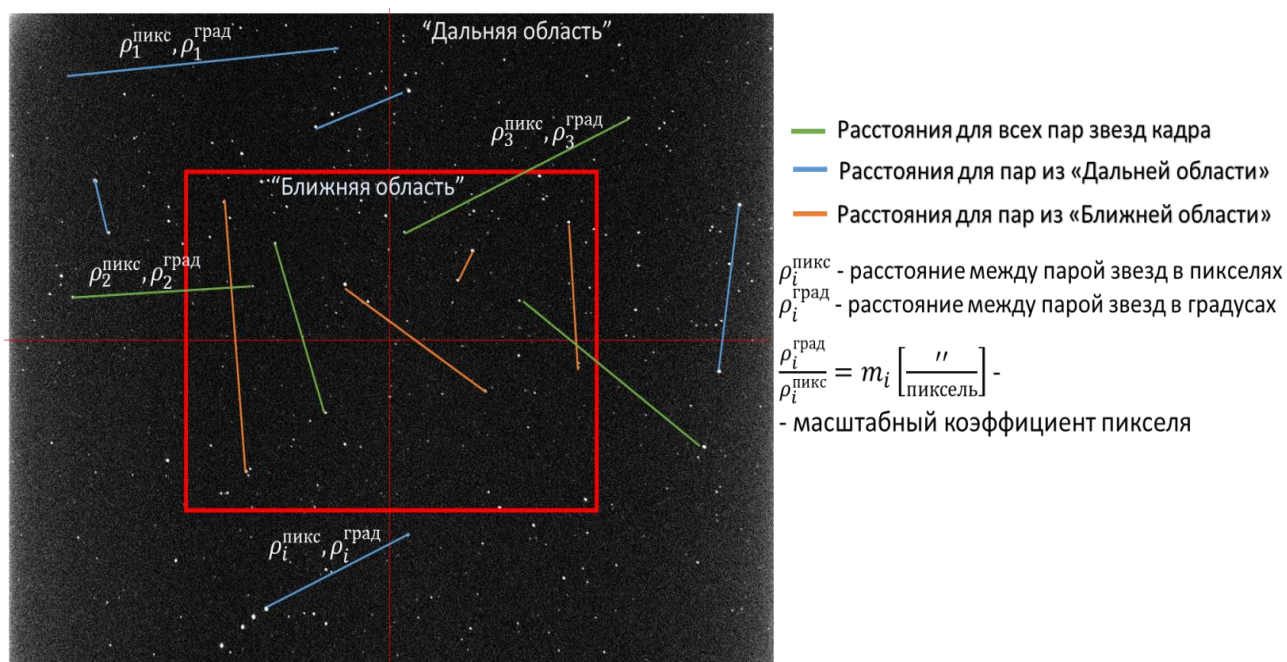


Рисунок 25. Пример разделения звезд на пары в кадре звездного неба

Пример изменения значения масштабного коэффициента пикселя для единичного кадра звездного неба показан на рисунке 26.

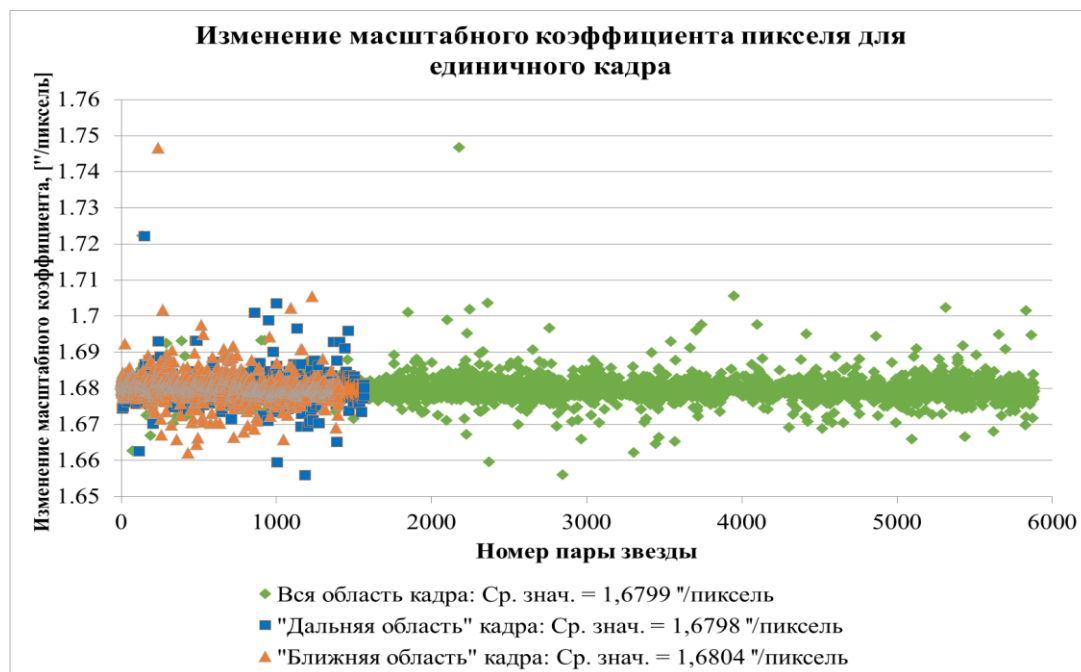


Рисунок 26. Пример изменения масштабного коэффициента пикселя для единичного кадра звездного неба

Как видно из рисунка 26, зависимость значения масштабного коэффициента пикселя от месторасположения пар звезд в кадре звездного неба не наблюдается. Средняя разность значений масштабного коэффициента между различными парами звезд не превышает 0,001 "/пиксель.

Пример изменения значения масштабного коэффициента для серии наблюдений из 24 кадров звездного неба показан на рисунке 27.

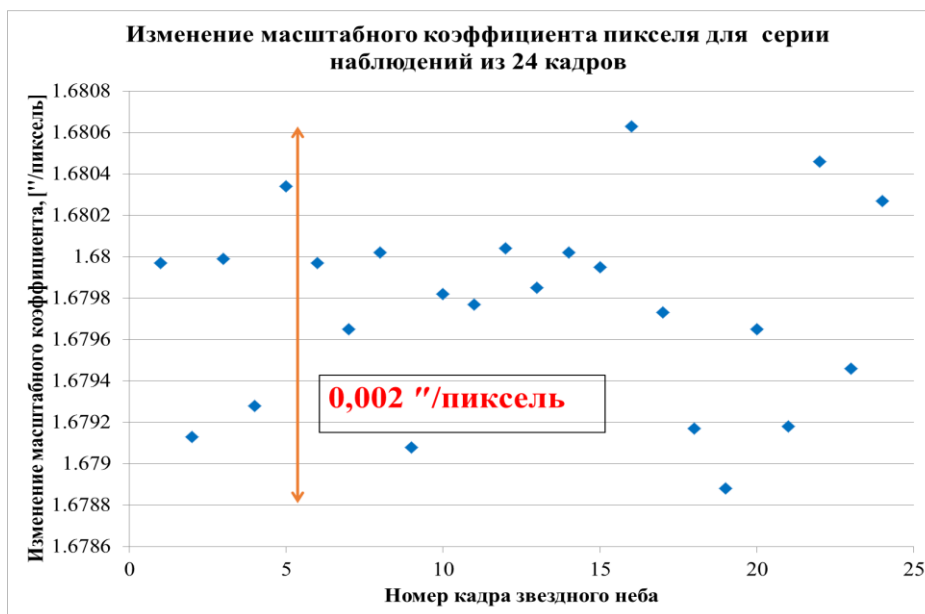


Рисунок 27. Пример исследования масштабного коэффициента для серии наблюдений из 24 кадров

Как видно из рисунка 27, разброс значений масштабного коэффициента не превышает 0,002 "/пиксель.

Таким образом, можно сделать заключение, что изменение масштабного коэффициента пикселя составляет не более 0,002 "/пиксель ($< 0,2\%$ от среднего значения m). Это является пренебрежимо малой величиной и не влияет на точность измерений.

4.3.2 Исследование влияния выбора метода определения координат центров звезд на точность итоговых значений УОЛ

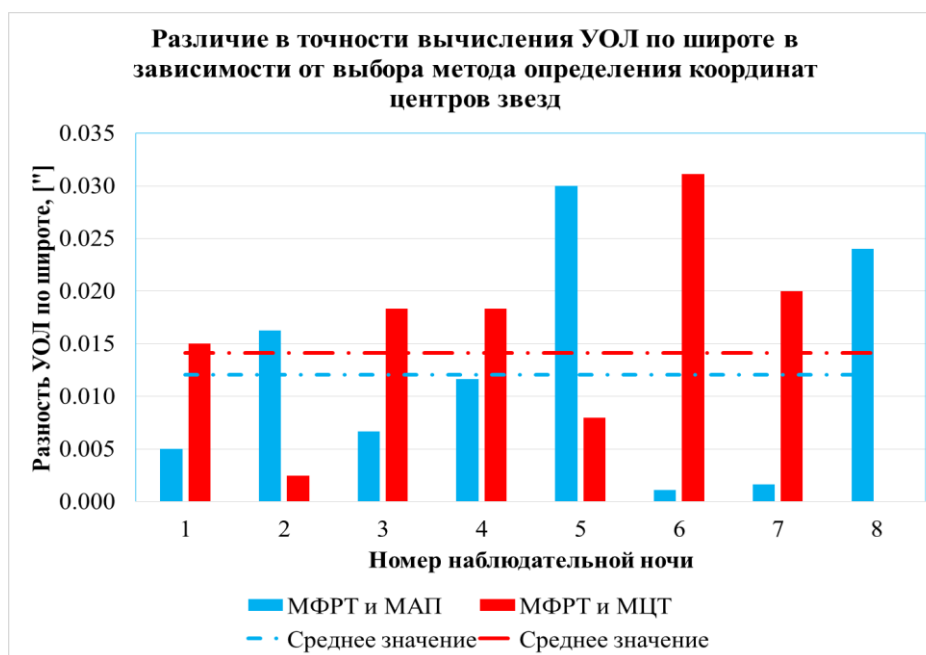
Основные методы определения координат центров звезд были рассмотрены выше (см. п. 1.4.3):

- 1) Метод центра тяжести (МЦТ).

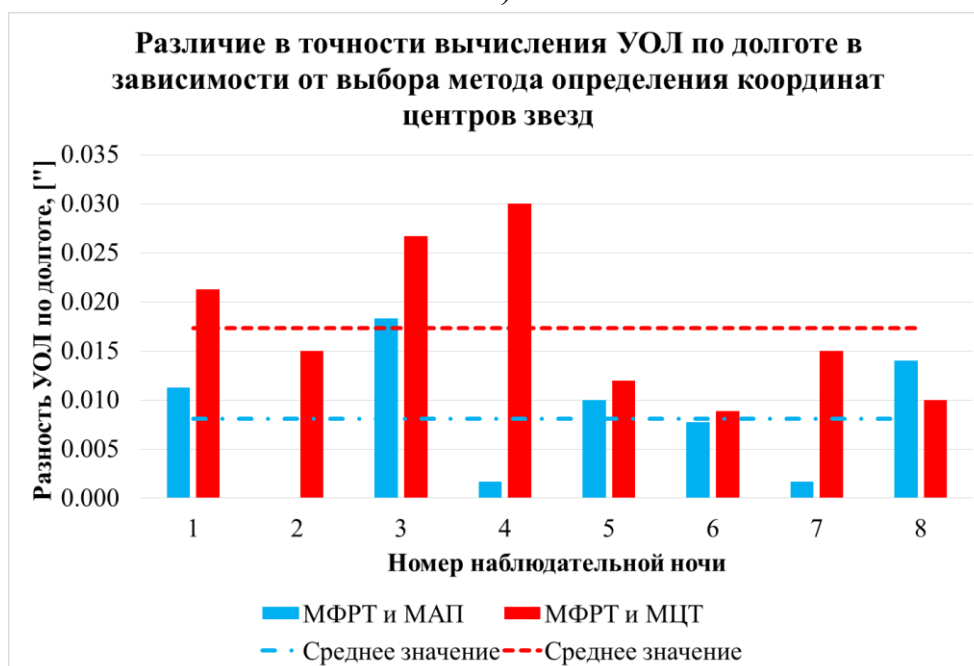
2) Метод функции рассеяния точки (МФРТ).

3) Метод аппроксимации формы звезды параболоидом (МАП).

Исследования по оценке влияния выбора метода определения координат центров звезд на точность итоговых значений УОЛ были проведены для 8 наблюдательных ночей. Опорные значения УОЛ вычислялись на основе использования МФРТ (рисунок 28).



а)



б)

Рисунок 28. Различие в точности определения УОЛ при выборе метода определения координат центров звезд: а) по широте; б) по долготе

Из рисунка 28 видно, что влияние выбора метода определения координат центров звезд на точность значений УОЛ в среднем не превышают 0,017", что является несущественной величиной [124].

4.3.3 Исследование влияния выбора звездного каталога на точность итоговых значений УОЛ

Оценка влияния методов редукации координат звезд на итоговые значения УОЛ

В п. 1.4.4 были рассмотрены звездные каталоги и их характеристики. Как было сказано выше, координаты звезд в каталоге приведены на определенную эпоху (J2000.0 или J2015.5), и необходимо выполнить их пересчет на эпоху наблюдения (рисунок 29).

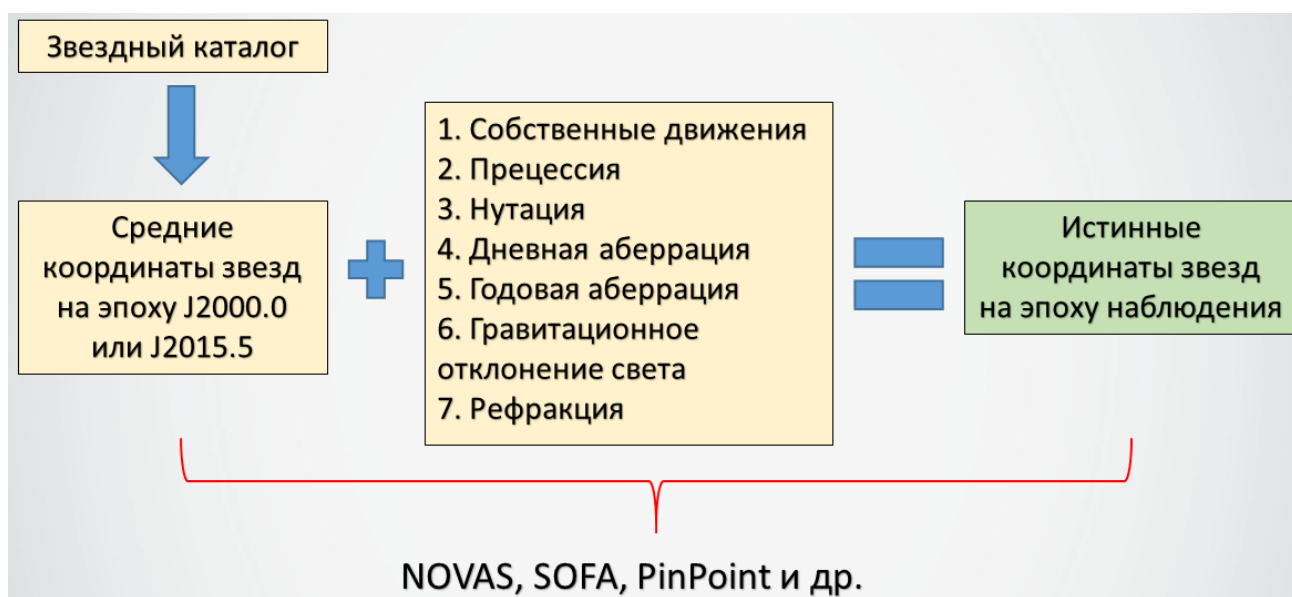


Рисунок 29. Алгоритм пересчета средних координат звезд на эпоху наблюдения

Исследования по оценке влияния библиотек NOVAS и SOFA на итоговые значения УОЛ были проведены для четырех наблюдательных звездных ночей (рисунок 30).

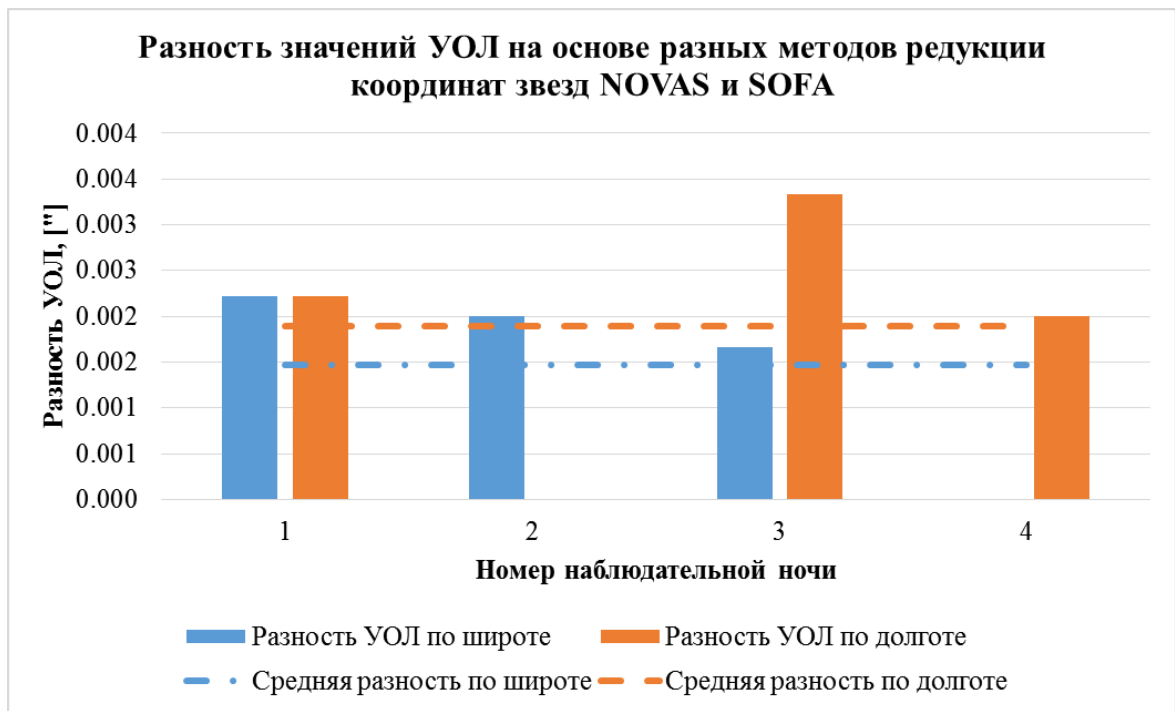
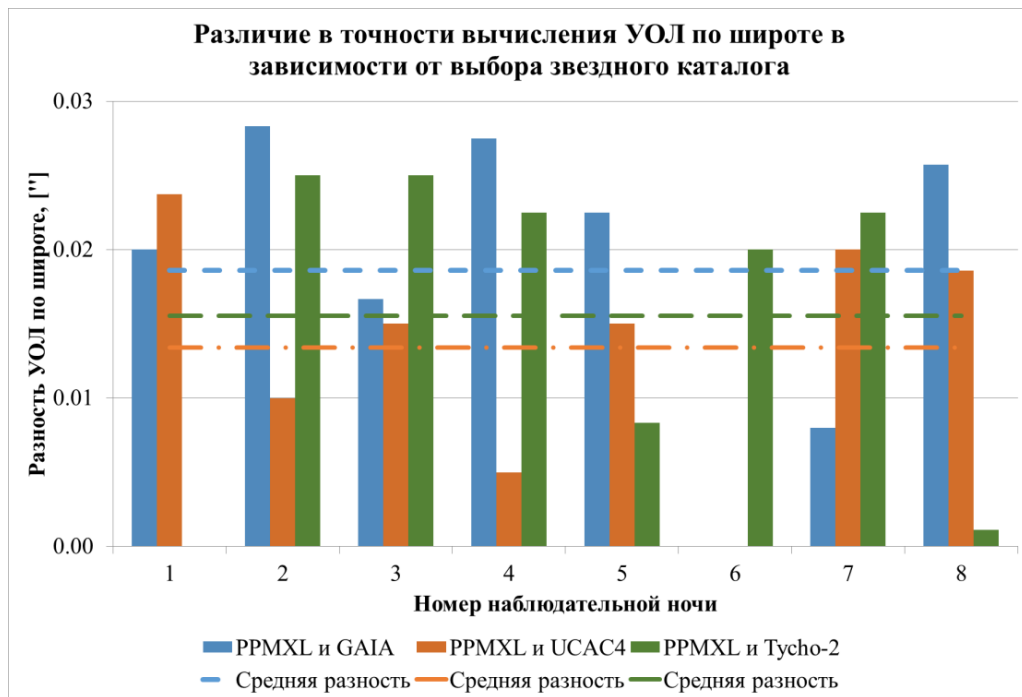


Рисунок 30. Разность значений УОЛ на основе разных методов редукции координат звезд NOVAS и SOFA

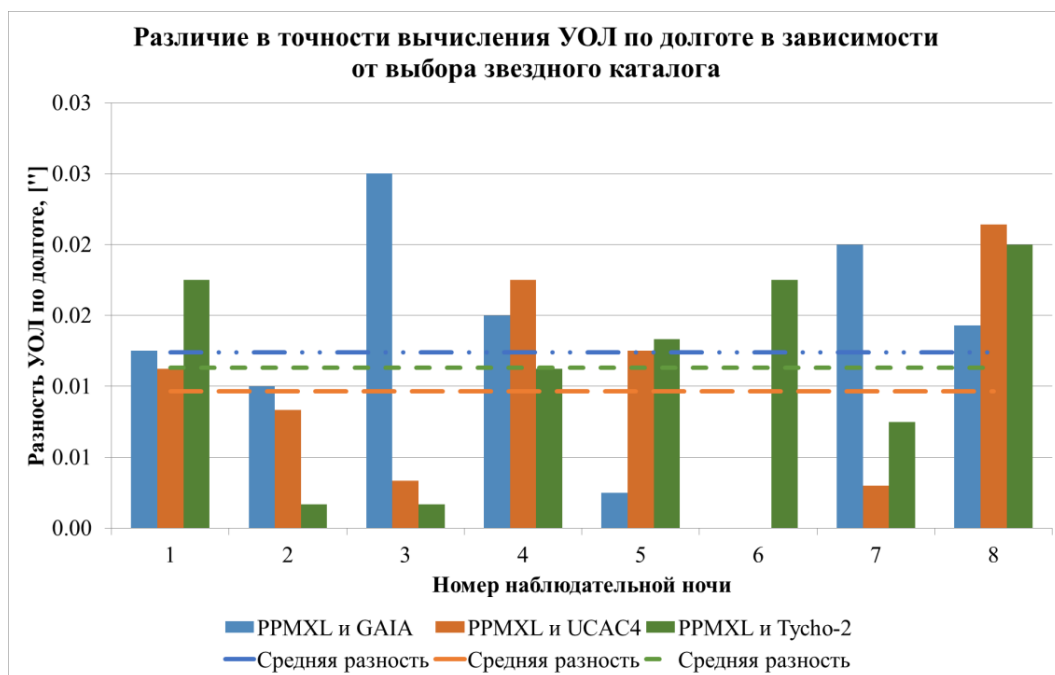
Анализ рисунка 30 показывает, что влияние выбора метода редукции на точность итоговых значений УОЛ находится в среднем на уровне 0,002", что является пренебрежимо малой величиной.

Оценка влияния выбора звездного каталога

Исследования по оценке влияния выбора звездного каталога на итоговые значения УОЛ были проведены для 8 наблюдательных ночей. Для каждой наблюдательной ночи сравнивались значения УОЛ, полученные с использованием звездного каталога PPMXL, и значений УОЛ, полученных с использованием звездных каталогов UCAC4, Tycho-2 и GAIA DR2 (рисунок 31).



а)



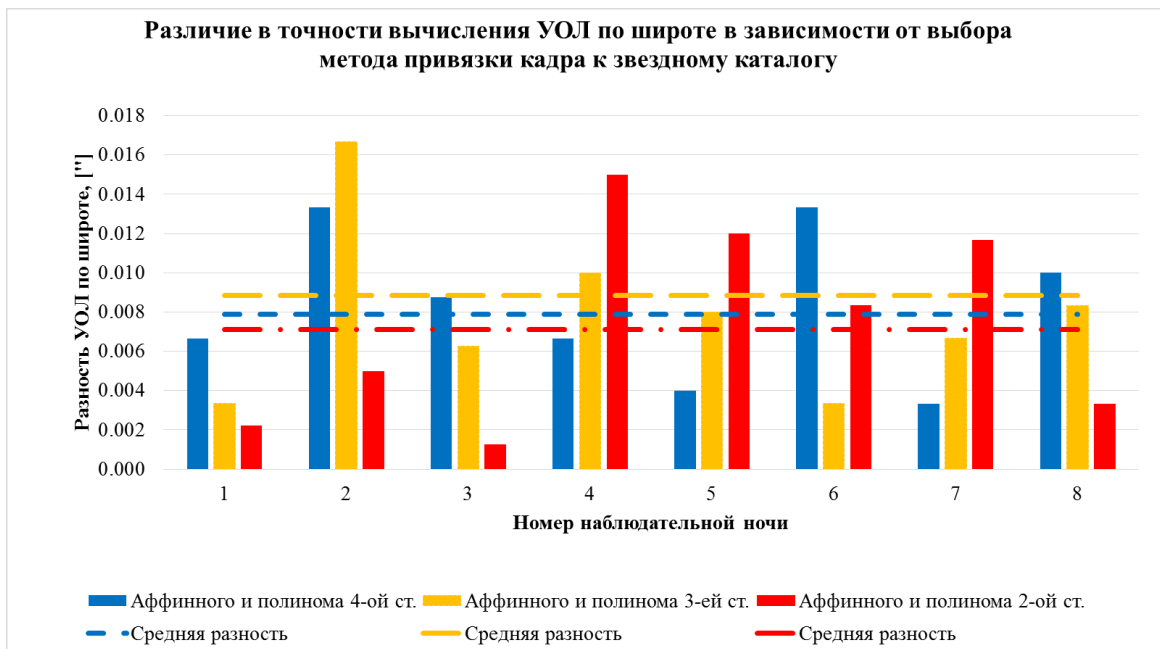
б)

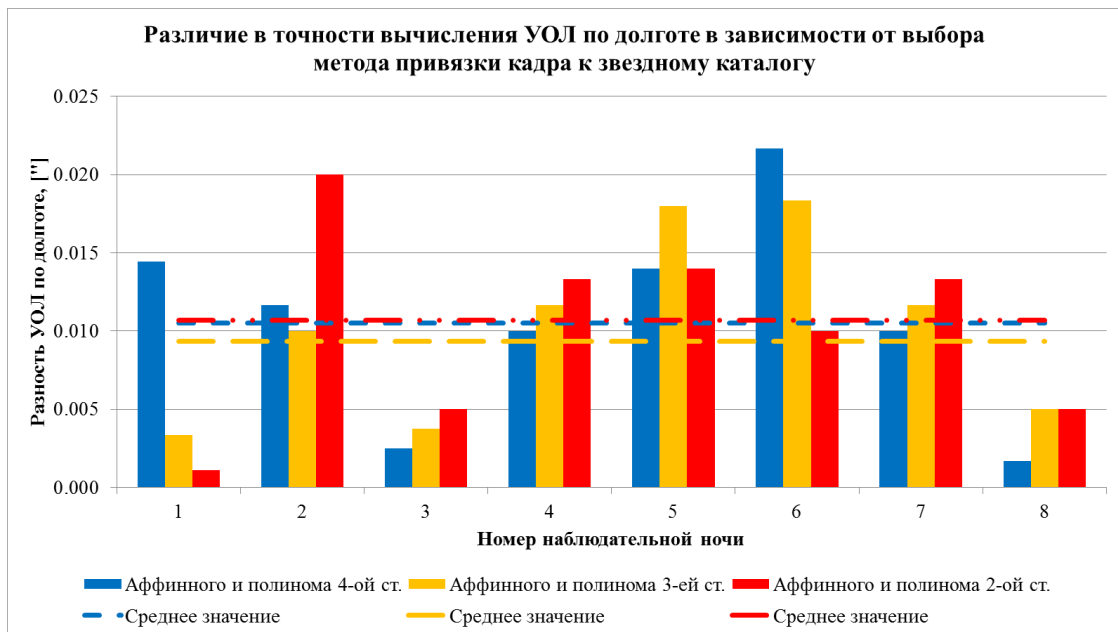
Рисунок 31. Различие в точности определения УОЛ при выборе звездного каталога: а) по широте; б) по долготе

Как видно из рисунка 31, среднее влияние выбора звездного каталога на точность определения составляющих УОЛ не превышает 0,02", что является незначительной величиной [124].

4.3.4 Исследование влияния выбора метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу на итоговые значения УОЛ

Вторым независимым методом определения величин искажений в кадре звездного неба является сравнение различных методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу. Исследования по оценке влияния выбора метода привязки (полиномов 2-ой, 3-ей и 4-ой и аффинного методов) на итоговые решения были проведены для 8 наблюдательных ночей. Опорные значения УОЛ по широте и по долготе получены с использованием линейного (аффинного) метода. На рисунке 32 приведены разности значений УОЛ при использовании аффинного метода и полинома 2-ой, 3-ей и 4-ой степени.





б)

Рисунок 32. Различие в точности определения УОЛ при выборе метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу: а) по широте; б) по долготе

Как видно из рисунка 32, влияние выбора метода привязки на значения составляющих УОЛ в среднем не превышает 0,01". Т.е. использование полинома несущественно влияет на точность определения УОЛ. Это говорит о том, что искажения, возникающие в оптической системе телескопа, пренебрежимо малы [124].

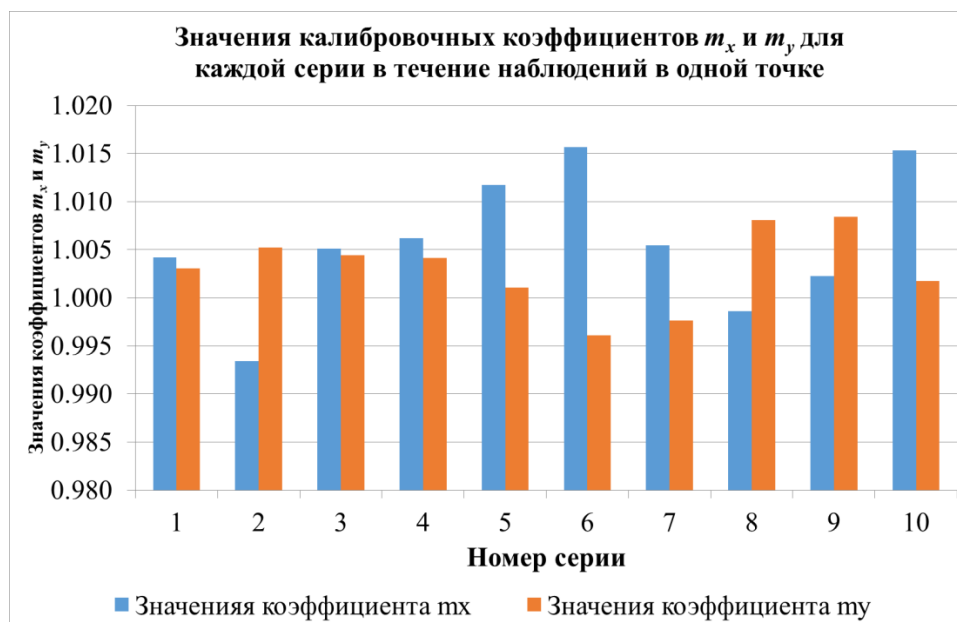
Вывод по разделу 4.4: проведенные исследования показали, что суммарное влияние выбора трех рассмотренных методов определения координат центров звезд, четырех высокоточных звездных каталогов и четырех методов привязки кадра звездного неба к звездному каталогу на точность определения УОЛ не превышает 0,03", что является несущественной величиной.

4.4 Исследование влияний изменений калибровочных коэффициентов астроизмерителя на итоговые значения УОЛ

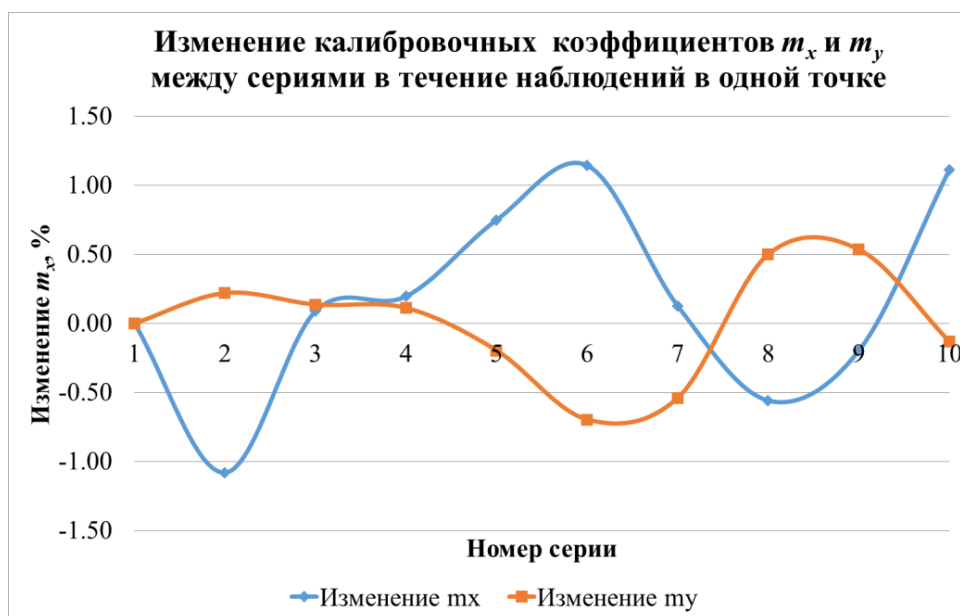
Как было отмечено в п. 2.7, в традиционном методе измерений калибровочные коэффициенты, определенные перед началом наблюдений, используются в дальнейшем как постоянные величины. В связи с этим, необходимо проведение

исследований по оценке изменений калибровочных коэффициентов астроизмерителя и их влияния на итоговые значения УОЛ.

Пример значений калибровочных коэффициентов, а именно, масштабных коэффициентов m_x и m_y для каждой серии и их изменение между сериями в течение наблюдения в одной точке представлены на рисунке 33 а, б.



а)

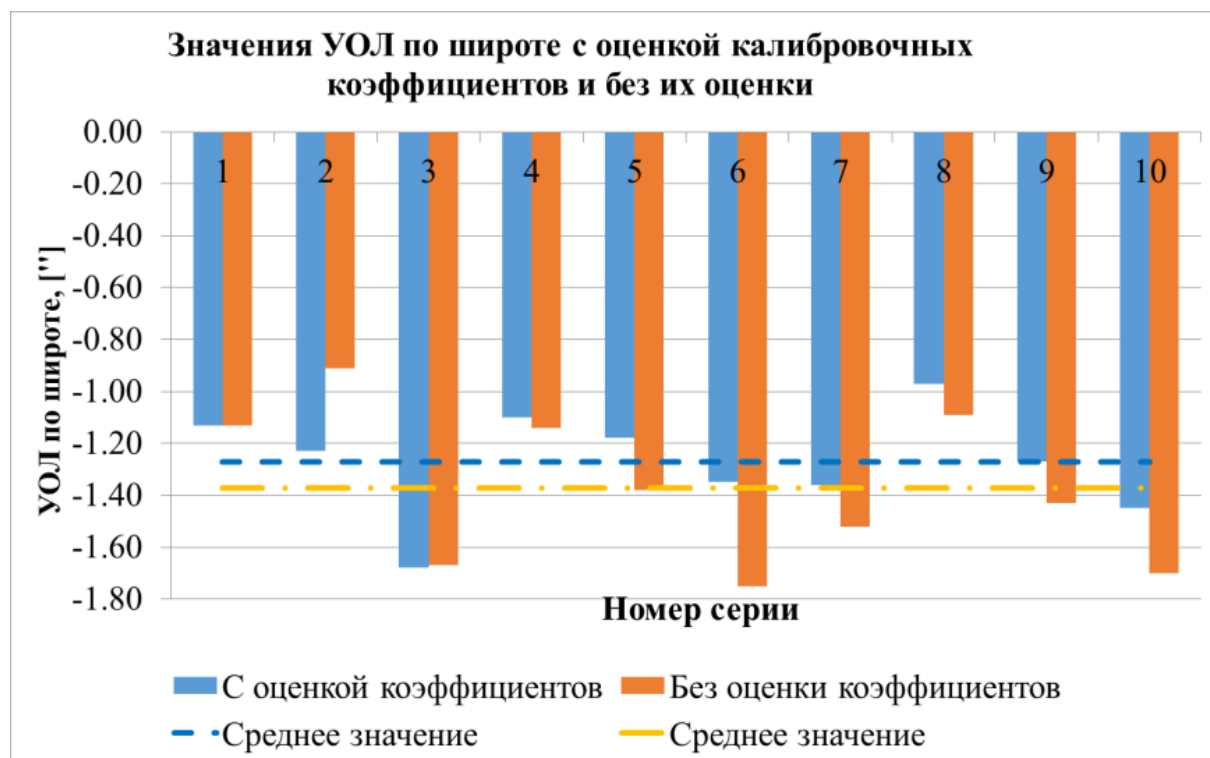


б)

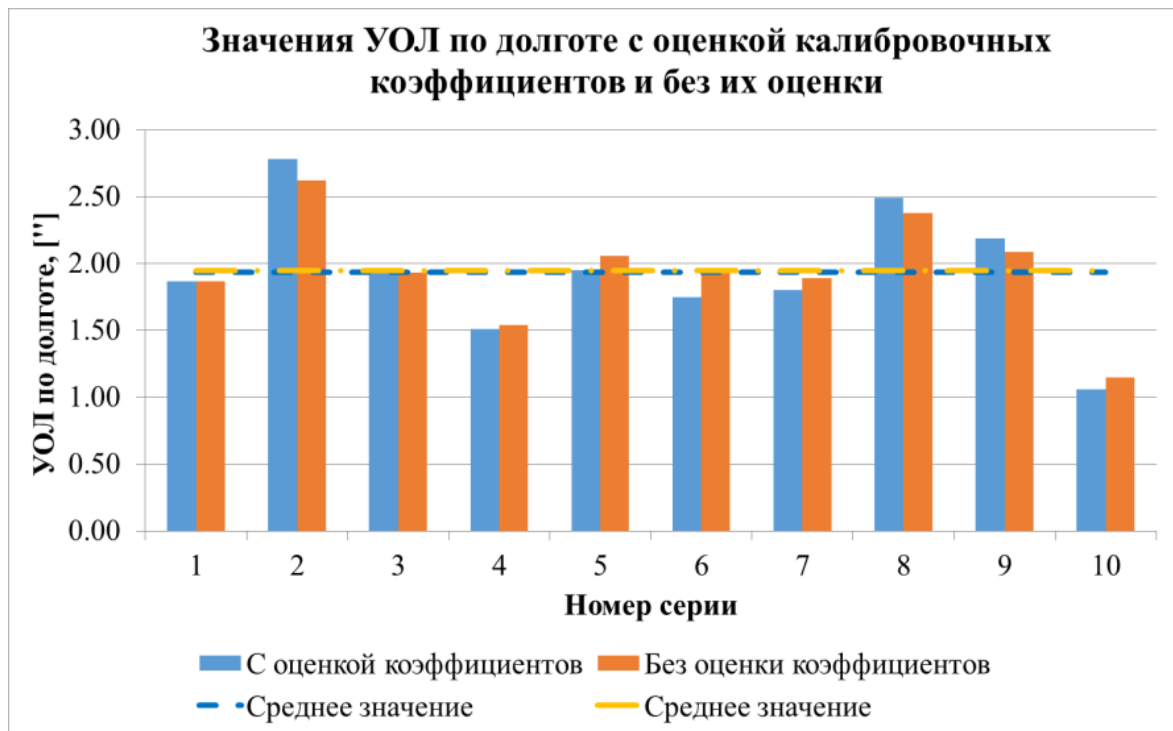
Рисунок 33. Калибровочные коэффициенты m_x и m_y в одной наблюдательной точке: а) их значения для каждой серии; б) их изменение в процентах относительно значений первой серии

Как видно из рисунка 33, изменение коэффициентов m_x и m_y происходят случайным образом в течение наблюдений в одной точке, а величина изменений может превышать 1 %.

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, определенные в первой серии (см. рисунок 33 а), используем как постоянные значения для всех остальных серий. Пример исследования для той же наблюдательной точки показан на рисунке 34.



а)

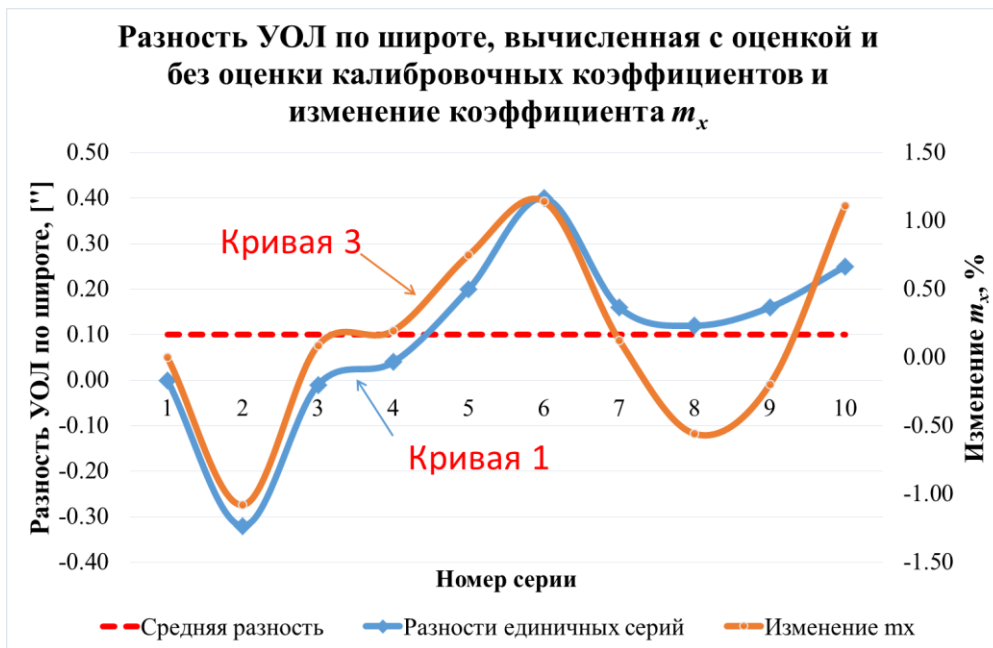


б)

Рисунок 34. Сравнение значений УОЛ, вычисленных с оценкой калибровочных коэффициентов для каждой серии и без их оценки: а) по широте; б) по долготе

Отсюда следует, что в зависимости от значения калибровочных коэффициентов m_x и m_y в течение наблюдений в одной точке вычисленные значения УОЛ изменяются в разных сериях измерений.

На рисунке 35 а) и б) приведены кривые изменения вычисленных значений УОЛ в зависимости от номера серии (кривые 1 и 2) и изменение калибровочных коэффициентов (кривые 3 и 4).



а)



б)

Рисунок 35. Разности УОЛ, вычисленные с оценкой и без оценки калибровочных коэффициентов для каждой серии и изменение масштабных коэффициентов инклинометра: а) по широте и m_x ; б) по долготe и m_y

Как видно из рисунка 35, наблюдается четкая корреляция между разностью УОЛ и изменением масштабных коэффициентов инклинометра m_x и m_y . При этом разности единичных серий могут достигать до 0,4", средняя разность УОЛ по широте составляет 0,10", а по долготe -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 еще раз подтверждает целесообразность ее использования.

4.5 Испытания разработанного метода повышения точности и оперативности измерения УОЛ на астроизмерительном испытательном стенде

4.5.1 Условия испытаний

Требования к количеству измерительных положений телескопа (количеству измерений) в единичной серии

Предложенный метод в единичной серии измерений предполагает получение кадров звездного неба и значений показаний инклинометра в текущем стационарном положении телескопа. В соответствии с практической реализацией метода (см. п. 3.4.) процесс измерений состоит из двух циклов по 12 стационарных положений телескопа в каждом цикле.

Требования к месту размещению испытательного стенда

Для применения нового метода измерений с астроизмерительным стендом нет необходимости в специальных железных, бетонных или иных основаниях. Достаточным условием является наличие твердого основания: грунтовой или асфальтированной дороги или площадки, плоскость которого стабильна во время измерений в i -ом стационарном положении телескопа. При отсутствии таких оснований, наблюдения можно выполнять и на обычном травяном, песочном или ином основании, предварительно утоптав места установки ножек нижней механической треноги из состава стенда.

В состав астроизмерительного стенда входит бленда, которая отсекает паразитную боковую засветку от различных источников: фонари уличного освещения, проезжающая мимо машина и т.д. В связи с этим, выполнение наблюдений с испытательным стендом возможно в непосредственной близости, но не менее 30-40 м от уличных фонарей или проезжающей мимо машины. Основное условие – отсутствие непосредственного прямого попадания источника «паразитной» засветки внутрь бленды и на объектив телескопа.

Требования к количеству звезд

Для вычисления полной матрицы ориентации ПЗС-сенсора по кадрам звездного неба, в соответствии с алгоритмами нового метода, необходимо наличие в кадре звездного неба в каждом положении телескопа не менее 30 звезд. Желаемое количество – 100 звезд.

Основные требования к испытательному стенду

Основными требованиями к испытательному стенду во время испытаний являются:

- 1) жесткость системы телескоп–ПЗС-камера–инклинометр;
- 2) отсутствие воздействий на испытательный стенд непосредственно во время записей данных в каждом положении: показаний инклинометра и кадра звездного неба.

Источниками воздействий на испытательный стенд во время записей данных в каждом положении могут быть легкое дуновение ветра, проезжающая в непосредственной близости машина, сам оператор, который подошел слишком близко и т.д. При этом наличие воздействия внешних факторов обнаруживаются только при непосредственной обработке данных измерений по оценке разброса показаний инклинометра. Если разброс показаний инклинометра в i -ом положении телескопа превышает заданный порог, то данные измерений в этом положении будут отбраковываться как недостоверные.

Еще одним фактором, влияющим на измерения, может стать небольшое облако на небе. Если при непосредственном экспонировании кадра звездного неба в

некоторых положениях телескопа будет облако, то эти данные будут отбраковываться. Однако, в связи с тем, что количество стационарных положений телескопа равно 24, отбраковка нескольких измерений не окажет влияние на итоговые результаты.

4.5.2 Описание основных географических точек проведения испытаний с астроизмерительным испытательным стендом

Испытания нового метода измерений УОЛ с астроизмерительным стендом выполнялись на различных географических точках: на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» в астрономическом павильоне («Астропавильон»), на астрономических точках «Боровичи» и «Вороново» и точке «Жилино», которые расположены в открытом поле, а также на точке «Серпухов».

Астрономическая точка «Боровичи»

Астрономическая точка «Боровичи» расположена на территории г. Боровичи Новгородской области и представляет собой бетонный постамент размером 80x80x60 см и расположен в лесу. Место тихое, спокойное, вдалеке от источников засветки и автомобильных дорог. Среднее количество звезд в кадре около 100.

Испытания на точке проводились в течение двух ночей подряд. В каждую наблюдательную ночь выполнялись 6 серий измерений. Каждая серия измерений состояла из двух циклов по 12 стационарных положений телескопа в горизонтальной плоскости. Длительность каждой серии составляет 6 минут. Результаты испытаний для каждой наблюдательной ночи представлены в таблице 16 (разности для каждой серии относительно среднего значения и СКО всех серий по обеим составляющим УОЛ).

Таблица 16. Результаты испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом в точке «Боровичи»

№ 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 16, 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.

Астрономическая точка «Вороново»

Астрономическая точка «Вороново» расположена недалеко от с. Головтеево Малоярославецкого района Калужской области в открытом поле, вдалеке от источников засветки и автомобильных дорог. По этой причине среднее количество звезд в кадре составило 300.

Испытания на данной точке выполнялись в течение двух ночей подряд. В каждую наблюдательную ночь выполнялось по 6 серий измерений. При выполнении первых серий наблюдений во вторую наблюдательную ночь было обнаружено, что невязка решения уравнения модели составляет 4"-5" (см. п. 4.2.9). Это свидетельствовало об отсутствии жесткости системы телескоп – ПЗС-камера – инклинометр. Это было вызвано, скорее всего, трясками при перевозке испытательного стенда. В связи с этим астроизмерительный испытательный стенд был разобран полностью и собран на месте наблюдений. Это привело к тому, что дальнейшие наблюдения стали удовлетворительными. Результаты испытаний представлены в таблице 17.

Таблица 17. Результаты испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом в точке «Вороново»

№ 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	-0,20"	0,04"	-0,16"	-0,03"
2	-0,38"	0,14"	0,28"	0,19"
3	0,14"	-0,10"	-0,15"	0,36"
4	0,24"	0,06"	-0,08"	-0,18"
5	0,22"	0,06"	0,05"	0,05"
6	-0,02"	-0,19"	0,06"	0,00"
СКО	0,25"	0,12"	0,16"	0,20"

Как видно из таблицы 17, СКО вычисления составляющих УОЛ не превышает 0,25". При этом следует заметить, что разность значений составляющих УОЛ в течение двух ночей подряд находится на уровне 0,02"-0,03".

Точка «Жилино»

Точка «Жилино» расположена недалеко от д. Жилино Московской области Солнечногорского района. Точка расположена вдалеке от источников засветки, на открытой местности в непосредственной близости (не более 5 м) от автомобильной дороги. Однако так как дорога является малозагруженной (не более 1 машины в 30 минут), данный фактор отрицательного воздействия на точность измерений не оказал. Среднее количество звезд в кадре – 250.

Измерения на точке проводилось в течение одной ночи и состояло из 6 серий измерений. Результаты испытаний представлены в таблице 18.

Таблица 18. Результаты испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом в точке «Жилино»

№ серии и СКО	Одна наблюдательная ночь	
	$\xi_i - \bar{\xi}$	$\eta_i - \bar{\eta}$
1	0,00"	0,04"
2	0,05"	0,02"
3	-0,08"	-0,34"
4	-0,02"	0,23"
5	0,19"	0,04"
6	-0,13"	0,00"
СКО	0,11"	0,18"

Как видно из таблицы 18, СКО вычисления составляющих УОЛ не превышает 0,18".

Точка «Серпухов»

Точка «Серпухов» расположена в д. Гавшино недалеко от г. Серпухов Московской области. Она расположена в черте деревни на расстоянии около 70 м от среднезагруженной автомобильной дороги (1-2 автомобиля на интервале 10 минут). В непосредственной близости (около 50 м) от точки были включены лампы уличного освещения. Так как в состав испытательного стенда входит бленда, которая отсекает паразитную засветку, уличные осветительные лампы не создавали существенных помех для наблюдений. Среднее количество звезд в кадре 200.

Испытание на точке проводилось в течение одной ночи и состояло из 9 серий измерений. Во избежание вибрационных помех от проезжающих автомобилей наблюдения были начаты только после 23:00, когда интенсивность движения автомобилей снизилась до 1 автомобиля в 10 минут. Результаты испытаний представлены в таблице 19

Таблица 19. Результаты испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом в точке «Серпухов»

№ серии и СКО	Одна наблюдательная ночь	
	$\xi_i - \bar{\xi}$	$\eta_i - \bar{\eta}$
1	0,04"	-0,01"
2	-0,29"	-0,09"
3	-0,26"	-0,35"
4	0,34"	0,05"
5	0,12"	-0,02"
6	0,23"	0,13"
7	-0,04"	0,36"
8	0,02"	-0,02"
9	-0,08"	-0,09"
СКО	0,21	0,19

Как видно из таблицы 19, СКО вычисления составляющих УОЛ не превышает 0,21".

Точка «Астропавильон»

Точка «Астропавильон» расположена на территории ФГУП «ВНИИФТРИ» в астрономическом павильоне (см. п. 4.8). При выполнении наблюдений рядом стоящие источники уличного освещения выключаются. Однако освещение на остальной территории института и за территорией института присутствует. Близость г. Зеленограда и г. Москвы приводит к значительным фоновым засветкам. Среднее количество звезд в кадре составляет 150.

Испытания в точке проводились в течение 10 наблюдательных ночей с апреля по октябрь 2018 г. Пример испытаний для двух наблюдательных ночей представлен в таблице 20.

Таблица 20. Пример результатов испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом в точке «Астропавильон» для двух наблюдательных ночей

№ 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	0,16"	0,21"	-0,01"	-0,13"
2	0,18"	0,10"	0,02"	0,09"
3	0,07"	-0,02"	0,21"	-0,12"
4	0,09"	-0,04"	-0,15"	-0,15"
5	-0,30"	-0,08"	0,01"	0,16"
6	-0,18"	-0,16"	-0,10"	0,17"
СКО	0,20"	0,13"	0,12"	0,15"

4.5.3 Итоги испытаний нового метода

4.5.3.1 СКО вычисления УОЛ

Как отмечалось выше, испытания нового метода на испытательном стенде выполнялись на пяти рассмотренных выше точках в течение 16 наблюдательных звездных ночей в 2018 г.

Результаты испытаний нового метода с астроизмерительным испытательным стендом представлены на рисунке 36.



Рисунок 36. СКО вычисления составляющих УОЛ на пяти точках в течение 16 наблюдательных звездных ночей в 2018 г.

Как видно из рисунка 36, среднее значение СКО вычисления составляющих УОЛ не превышает 0,2". СКО некоторых единичных измерений не превышает 0,1".

Таким образом, результаты испытаний предложенного метода в полевых условиях показали, что поставленная цель в диссертационной работы достигнута:

- 1) Оперативность измерений повышена: время измерений в точке сократилось с 1,5 ч до 30 минут.
- 2) Точность измерений повышена: среднее значение СКО измерений составляющих УОЛ снижено 0,2";
- 3) Производительность измерений повышена в два раза: количество точек измерений за ночь - 5-8.

4.5.3.2 Вычисление неисключенной систематической погрешности измерений

УОЛ

В соответствии с моделью измерений (30) составляющих УОЛ с астроизмерителем формулы для расчета неисключенной систематической погрешности (НСП) измерений УОЛ Θ_ξ, Θ_η записываются в следующем виде [77]:

$$\begin{aligned} \Theta_\xi &= \pm |c_1 \cdot \Theta_B + c_3 \cdot \Theta_\Phi + c_5 \cdot \Theta_{inclX}|, \\ \Theta_\eta &= \pm K \cdot \sqrt{c_2^2 \cdot \Theta_L^2 + c_4^2 \cdot \Theta_\Lambda^2 + c_6^2 \cdot \Theta_{inclY}^2 + c_7^2 \cdot \Theta_{UTC}^2}, \end{aligned} \quad (56)$$

где $K = 1,4$ ($P = 0,99$);

c_i – коэффициенты чувствительности для каждой составляющей НСП;

Θ_i – i -ая составляющая НСП.

Значения составляющих НСП приведены в таблице 21.

Таблица 21. Значения составляющих НСП

Наименование	Обозначение	Значение
Погрешность определения геодезической широты	Θ_B	0,01"
Погрешность определения геодезической долготы	Θ_L	0,01"
Погрешность определения астрономической широты	Θ_Φ	0,3"
Погрешность определения астрономической долготы	Θ_Λ	0,3"
Погрешность определения текущего наклона по оси OX	Θ_{inclX}	0,6"
Погрешность определения текущего наклона по оси OY	Θ_{inclY}	0,6"
Погрешность определения времени экспозиции кадра звездного неба в шкале UTC	Θ_{UTC}	0,01"

Коэффициенты чувствительности c_i рассчитывались экспериментально измерением изменений значений УОЛ ξ, η , вызванные изменением заданной входной величины $X_i(B, L, \Phi, \Lambda, t_{UTC}, inclX, inclY)$, когда значения остальных входных величин поддерживаются постоянными [125]. Для каждой составляющей НСП был численно выполнен расчет коэффициента чувствительности по методу двусторонней разности [126]:

$$f'(X_i) = \frac{f(X_i + h) + f(X_i - h)}{2 \cdot h},$$

где X_i – i -ая входная величина, от которой зависит измеряемое значение УОЛ;

h – шаг дифференцирования.

Численный расчет коэффициентов чувствительности был выполнен для трех наблюдательных пунктов, расположенных на разных геодезических широтах и долготах: «Боровичи», «Астропавильон» и «Вороново».

В таблице 22 приведены средние значение коэффициентов чувствительности для каждой составляющей НСП.

Таблица 22. Коэффициенты чувствительности для каждой составляющей НСП

Коэффициенты чувствительности	Пункт	УОЛ по широте		УОЛ по долготе	
		шаг h			
		0,1	0,5	0,1	0,5
$c_1(B)$	«Астропавильон»	1,003	0,997	0,003	0,004
	«Боровичи»	1,006	0,998	0,007	0,01
	«Вороново»	1,005	0,999	0,011	0,002
$c_2(L)$	«Астропавильон»	0,003	0,004	0,556 (0,5587)	0,556
	«Боровичи»	0,008	0,003	0,521 (0,5238)	0,524
	«Вороново»	0,010	0,011	0,573 (0,5749)	0,576
$c_3(\Phi)$	«Астропавильон»	1,001	1,001	0,001	0,001
	«Боровичи»	1,001	0,999	0,001	0,001
	«Вороново»	1,001	0,999	0,001	0,001
$c_4(\Lambda)$	«Астропавильон»	0,001	0,001	0,560 (0,5587)	0,559
	«Боровичи»	0,001	0,001	0,523 (0,5238)	0,524
	«Вороново»	0,001	0,001	0,575 (0,5749)	0,575
$c_5(inclX)$	«Астропавильон»	0,237	0,244	0,001	0,001
	«Боровичи»	0,222	0,227	0,001	0,001
	«Вороново»	0,222	0,240	0,001	0,001
$c_6(inclY)$	«Астропавильон»	0,001	0,001	0,231	0,226
	«Боровичи»	0,001	0,001	0,231	0,235
	«Вороново»	0,001	0,001	0,241	0,221
$c_7(t_{UTC})$	«Астропавильон»	0,002	0,001	0,561 (0,5587)	0,560
	«Боровичи»	0,004	0,007	0,524 (0,5238)	0,524
	«Вороново»	0,004	0,001	0,578 (0,5749)	0,577

В скобках приведены косинусы широт пунктов

Как видно из таблицы 22, коэффициенты чувствительности для Θ_B и Θ_Φ равны 1; для Θ_L, Θ_Λ и $\Theta_{t_{UTC}}$ равны косинусу геодезической широты; для Θ_{inclY} и Θ_{inclX} равны 0,23.

В соответствии с (56) и таблицами 21 и 22, значения НСП для составляющих УОЛ для пункта «Астропавильон» равны: $\Theta_\xi = \pm 0,45''$; $\Theta_\eta = \pm 0,30''$.

4.6 Подготовка высокодискретной карты ГПЗ на основе разработанного метода и сравнение ее с картой на основе модели ГПЗ

4.6.1 Общие сведения

Глобальные модели геопотенциала представляют собой разложение потенциала силы тяжести в ряд по сферическим функциям. За последнее время появилось множество различных высокостепенных моделей гравитационного поля Земли, основанных на наземных, спутниковых, альтиметрических и градиентометрических данных [9, 127] (таблица 23).

Таблица 23. Некоторые глобальные модели геопотенциала Земли

Модель	Год	Степень	Данные	Организация
GECO	2015	2190	EGM2008, S(Goce)	DICA, Italy
EIGEN-6C4	2014	2190	A, G, S(Goce), S(Grace), S(Lageos)	GFZ Potsdam and GRGS Toulouse
GGMPlus	2013		GOCE, GRACE, EGM2008, Topography	Curtin University, Australia Technical University Munich, Germany
EIGEN-6C2	2012	1949	S(GOCE,GRACE,LAGEOS), G, A	Gfz-Potsdam
ГАО2012, Россия	2012	360	S(GOCE), G, A	ЦНИИГАиК, Россия
GIF48	2011	360	S(GRACE), G, A	University Texas
EIGEN-6C	2011	1420	S(GOCE,GRACE,LAGEOS), G, A	Gfz-Potsdam
EIGEN-51C	2010	359	S(GRACE,Champ), G, A	Gfz-Potsdam
GGM03C	2009	360	S(GRACE), G, A	Gfz-Potsdam
EIGEN-5C	2008	360	S(GRACE,LAGEOS), G, A	Gfz-Potsdam
EGM2008	2008	2190	S(GRACE), G, A	NGA
ЭМ2008	2006	360	S (GL04S), G, A	ВТУ МО РФ, Россия
EIGEN-GL04C	2006	360	S(GRACE,LAGEOS), G, A	Gfz, GRGS-Тулуза
EIGEN-CG03C	2005	360	S(Champ,GRACE), G, A	Gfz-Potsdam
EIGEN-CG01C	2004	360	S(Champ,GRACE), G, A	Gfz-Potsdam
ПЗ-2002/360	2004	360	S(ГЕО-ИК), G, A	ВТУ МО РФ, Россия
GGM02C	2004	200	S(GRACE), G, A	University Texas
GGM01C	2003	200	TEG4, S(GRACE)	University Texas

S – данные спутниковых миссий;
G – данные наземных измерений;
A – данные спутниковых альтиметрических миссий.

Глобальные модели геопотенциала позволяют получить информацию о длинноволновых характеристиках трансформант ГПЗ. Такие модели геопотенциала как EGM2008, GECO и EIGEN-6C4 имеют степень и порядок 2190 и обладают самым высоким пространственным разрешением 18 км. При этом в промежуточ-

ных точках значения вычисляемых трансформант ГПЗ определяются линейной интерполяцией.

Наземные измерения с высоким пространственным разрешением (3-5 км и меньше) трансформант ГПЗ позволяют получить информацию об их коротковолновых характеристиках. Комбинация глобальных моделей геопотенциала и наземных данных измерений является лучшим решением для создания карт трансформант ГПЗ высокого разрешения.

Сравнение глобальных моделей геопотенциала силы тяжести и данных наземных измерений проводились во многих работах [9, 11, 128].

В работе [9] цифровые модели карт УОЛ, созданные с использованием гравиметрических карт масштаба 1:200000 в четырех районах, три из которых расположены в центральной части России, а четвертый – в Охотском море (аномальный район), сравнивались со значениями, полученными по модели геопотенциала EGM2008. При этом полученная разность изменяется от минус 5" до плюс 5".

В работе [128] авторами выполнено сравнение значений УОЛ полученные для 320 пунктов Лапласа на территории Западной Сибири по астрономо-геодезическим данным и значения УОЛ по модели геопотенциала EIGEN-6C4 (рисунок 37). Следует заметить, что среднее расстояние между соседними точками превышает 50 км.

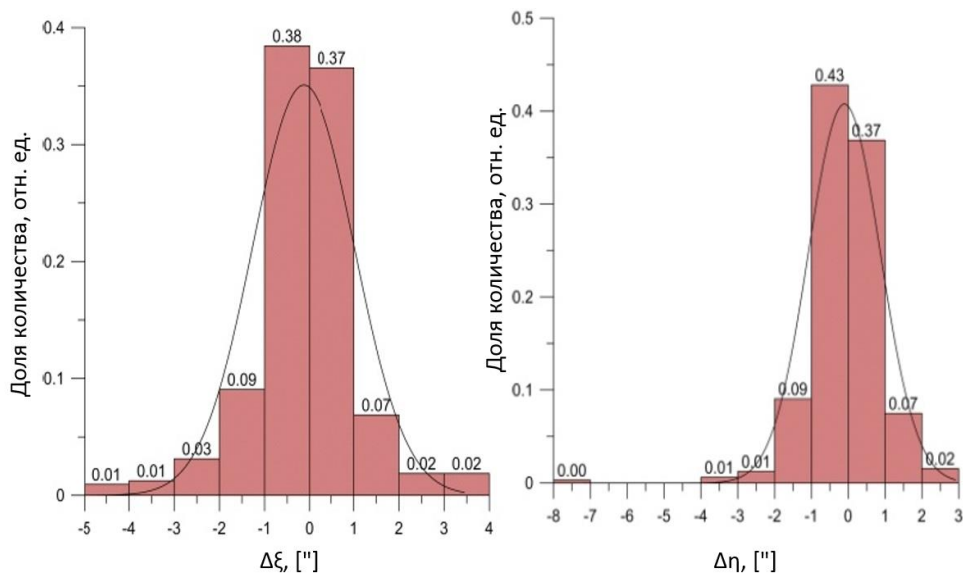


Рисунок 37. Гистограмма разности значений УОЛ, полученная по астрономо-геодезическим данным и модели EIGEN-6C4 в 320 пунктах Лапласа на территории Западной Сибири

Как видно из рисунка 37, разность значений УОЛ по широте изменяется от минус 5" до плюс 4", а по долготе от минус 4" до плюс 3".

В работе [11] сравнивались значения УОЛ, полученные на основе модели геопотенциала EGM2008, и значения УОЛ для 1056 пунктов на территории Европы, измеренные астрономо-геодезическим методом с 1983 г. по 2008 г. (рисунок 38).

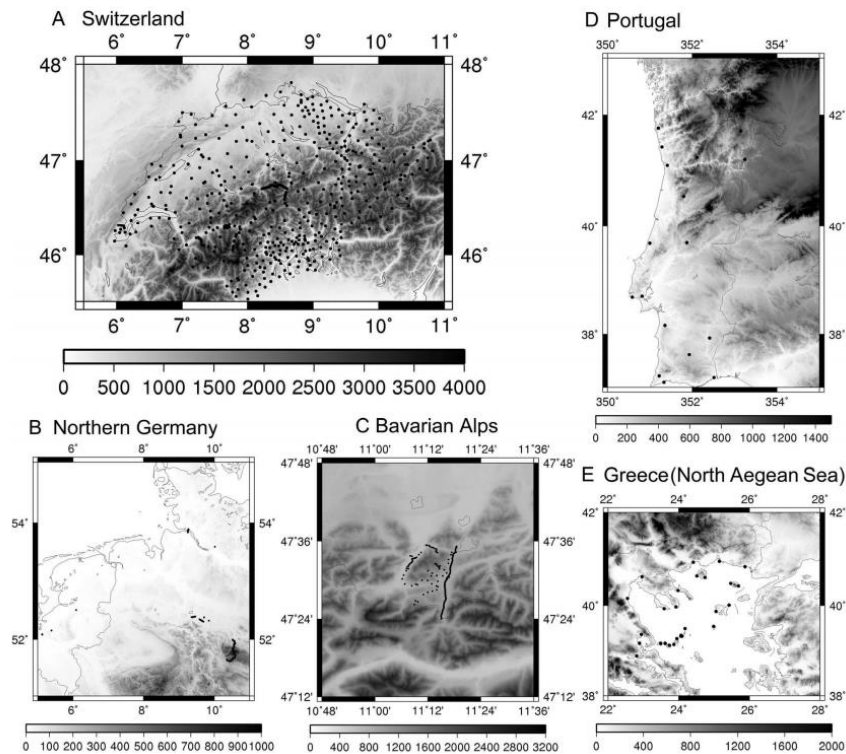


Рисунок 38. Пункты УОЛ, измеренные астрономо-геодезическим методом на территории Европы

Гистограммы полученных разностей показаны на рисунке 39.

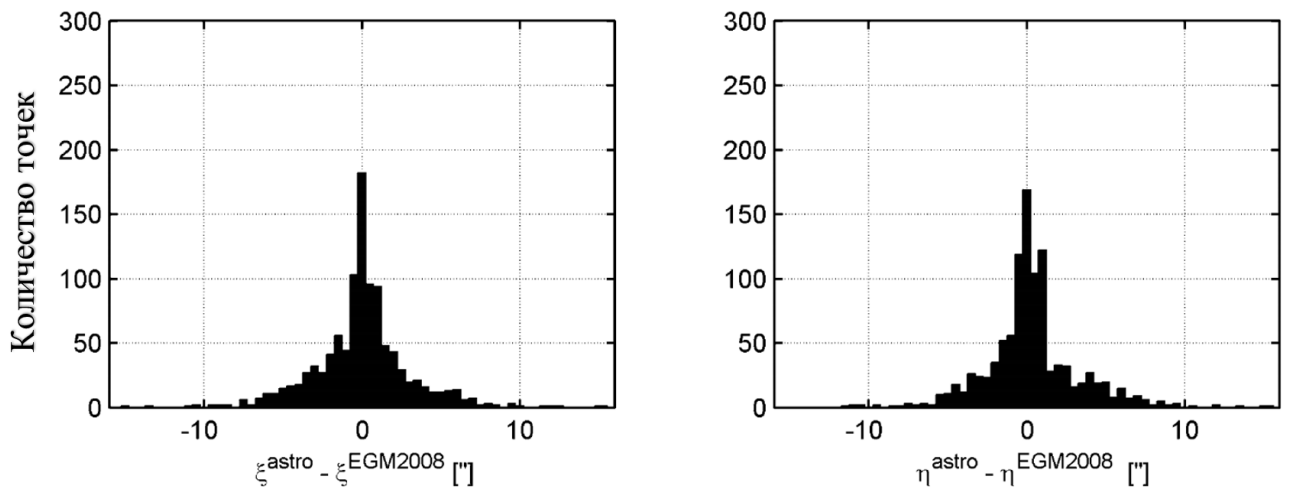


Рисунок 39. Гистограммы разностей модельных и измеренных значений УОЛ

Как видно из рисунка 39, разность модельных и контрольных значений изменяется в широких пределах: от минус 15" до плюс 15" по обеим составляющим УОЛ.

4.6.2 Подготовка карты высокой дискретности и точности на основе измерений УОЛ

В интересах решения задачи подготовки высокодискретной карты по ГПЗ на полигоне, подготовленной на территории Московской области, были выбраны 18 точек с расстоянием 3-5 км друг от друга (рисунок 40) [129, 130]. Размеры полигона соответствуют пространственному разрешению модели EGM2008 (18 км).

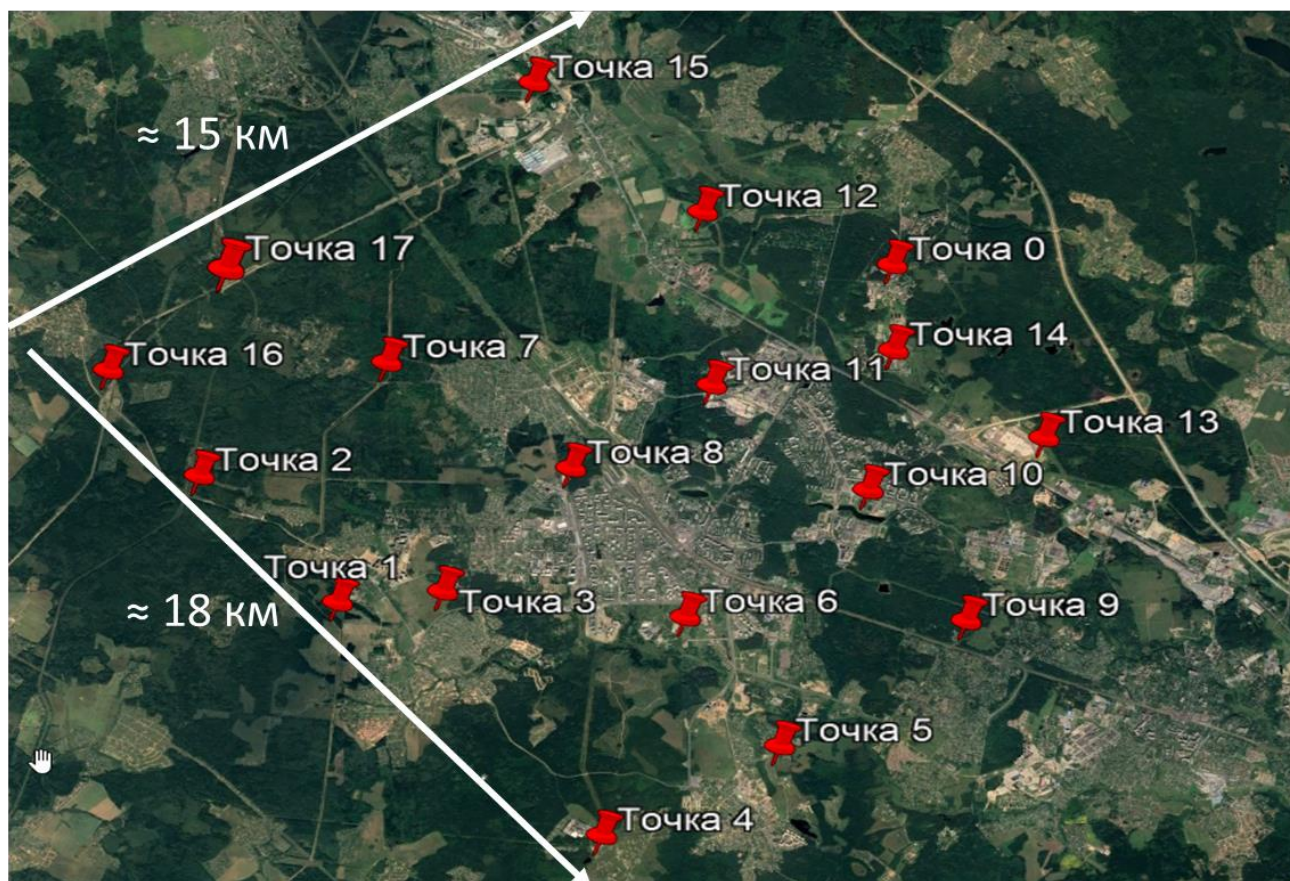


Рисунок 40. Точки высокодискретного полигона

На этих точках были проведены измерения УОЛ с помощью созданного астроизмерительного испытательного стенда.

СКО определения УОЛ для каждого пункта полигона и среднее значение СКО представлены на рисунке 41.

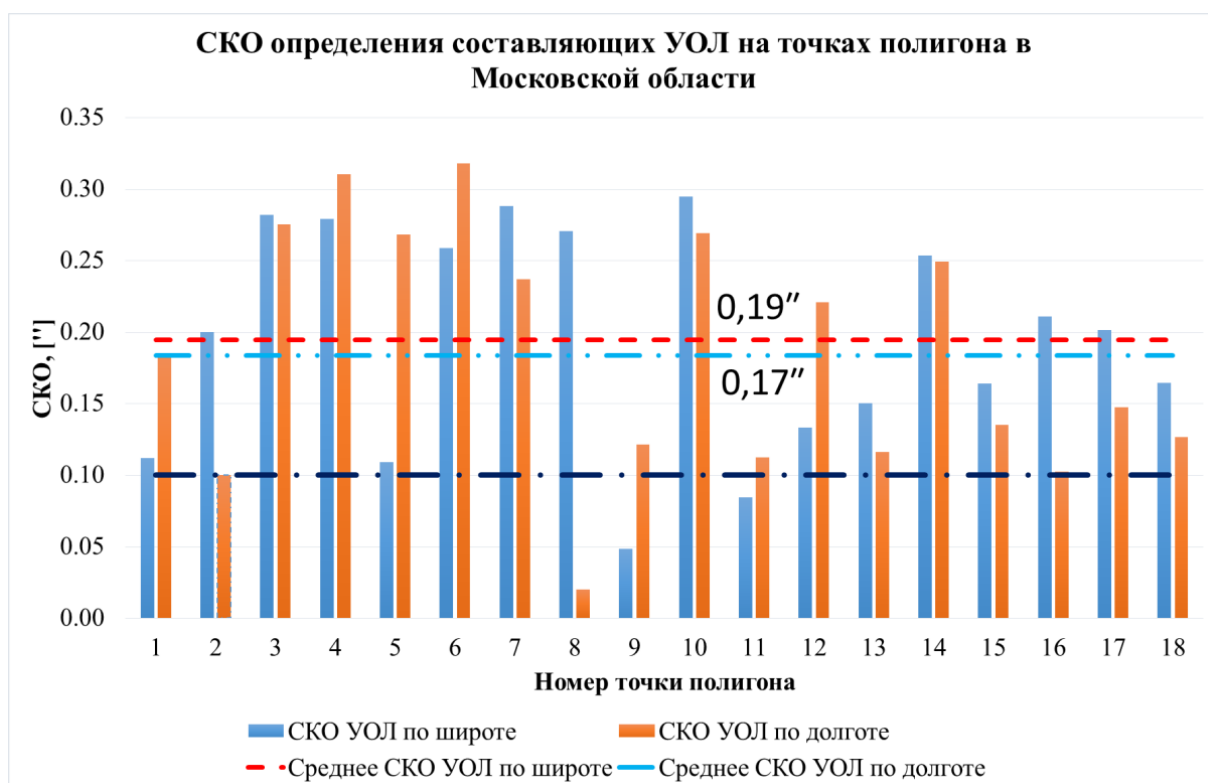
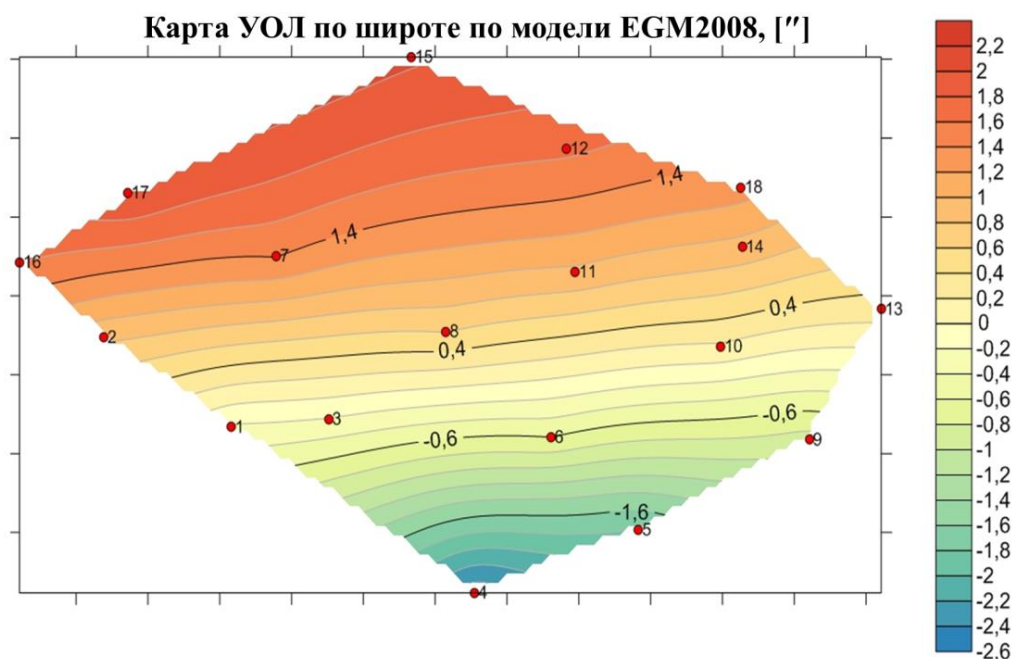


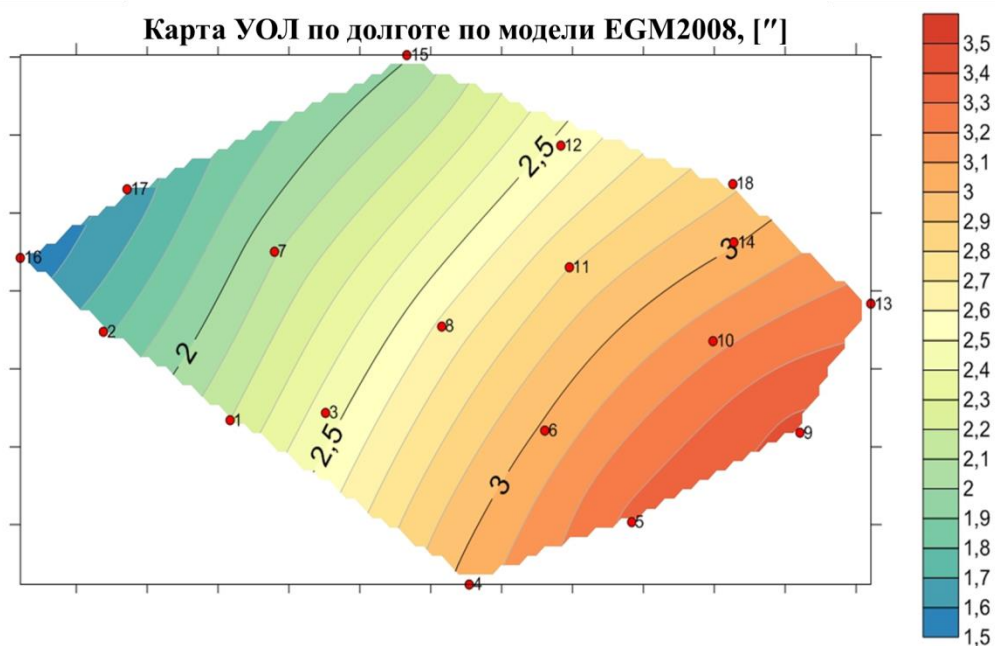
Рисунок 41. СКО определения составляющих УОЛ и среднее значение СКО для точек полигона

Как видно из рисунка 41, среднее значение СКО определения УОЛ не превышает 0,2". Наблюдаются единичные измерения с СКО на уровне 0,1" и менее. Однако, СКО некоторых единичных измерений могут достигать до 0,3". Это связано с особенностями месторасположения самого полигона (район Зеленограда, плотная застройка) и с тем, что некоторые точки полигона, для поддержания равномерности распределения, вынуждено располагались в непосредственной близости от источников помех (наличие уличного освещения и автомобильных дорог).

Для точек полигона были вычислены значения составляющих УОЛ по международно-признанной модели геопотенциала EGM2008 (рисунок 42, а, б). Наилучшее пространственное разрешение, соответствующее наиболее короткой длине волны изменения потенциала для этой модели на поверхности Земли, составляет 18 км.



а)



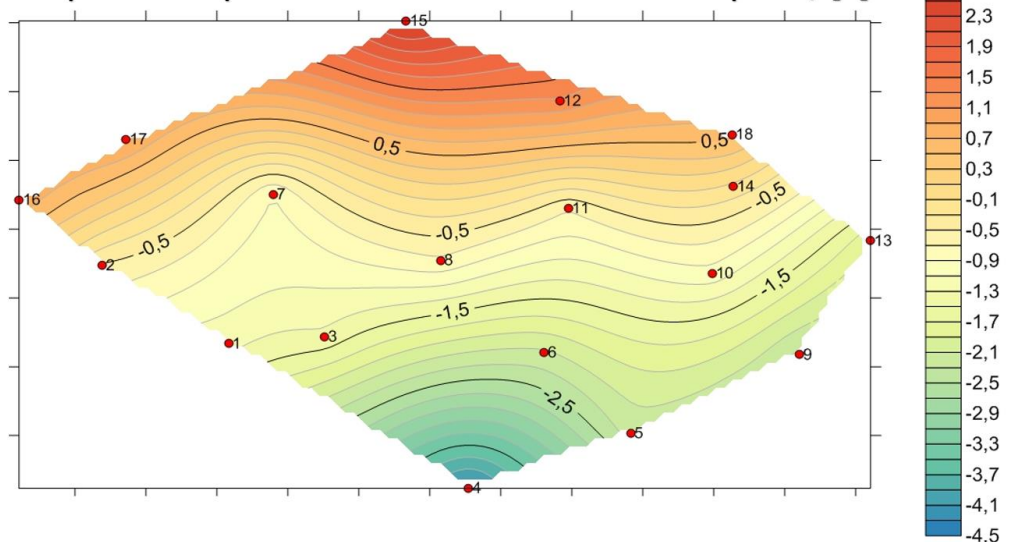
б)

Рисунок 42. Карты составляющих УОЛ по модели EGM2008: а) по широте; б) по долготе

Как видно из рисунка 42, на картах, вычисленных по модели, не наблюдается аномалий, фон равномерный. Значение УОЛ по широте изменяется от минус 2,6" до плюс 2,2", а по долготе – от плюс 1,5" до плюс 3,5".

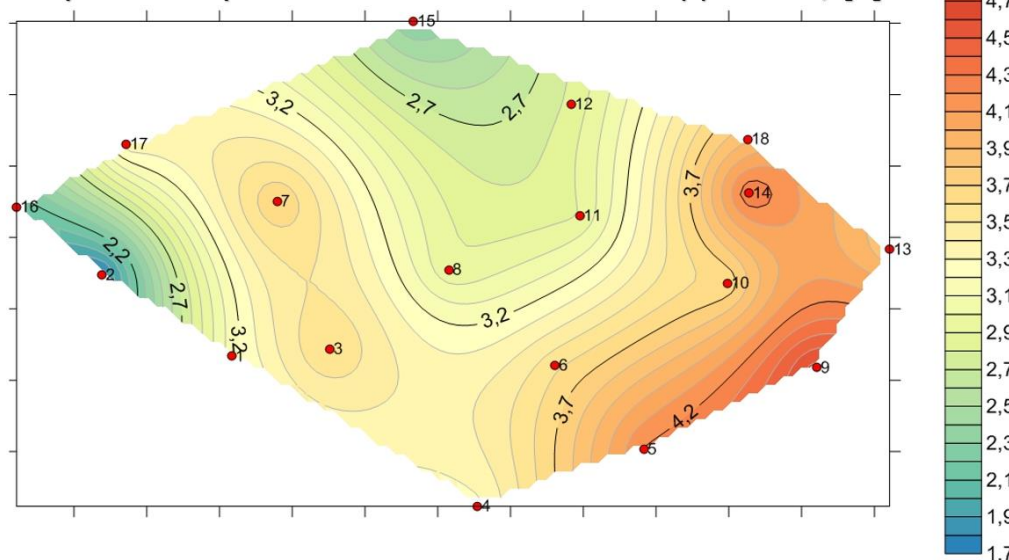
На рисунке 43 а, б представлены карты измеренных значений составляющих УОЛ.

Карта измеренных значений УОЛ по широте, ["]



а)

Карта измеренных значений УОЛ по долготе, ["]

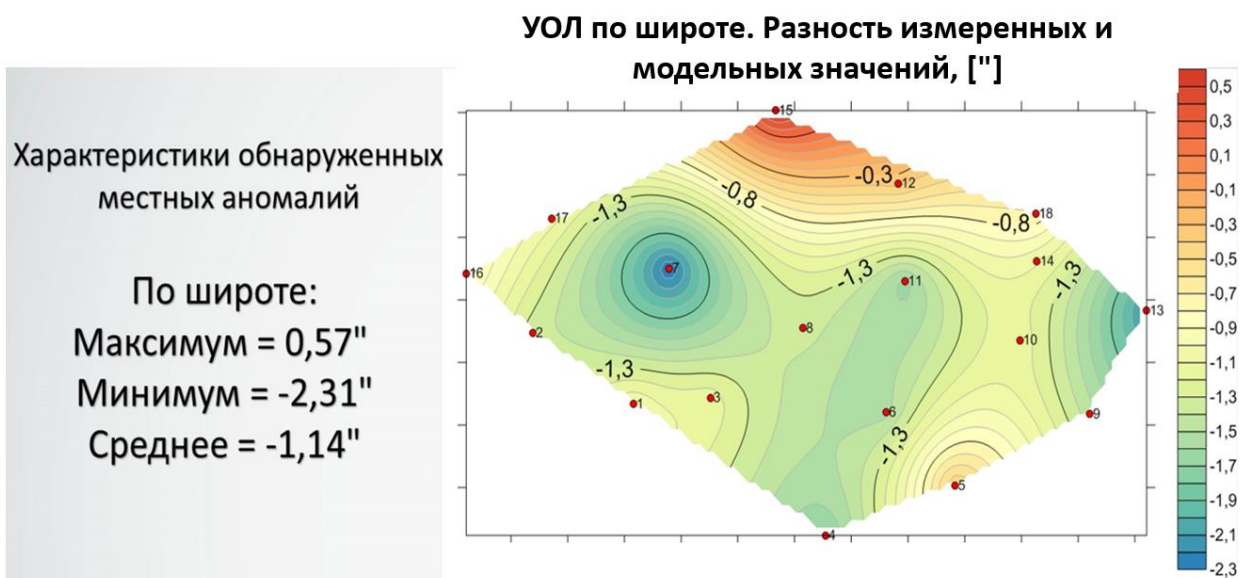


б)

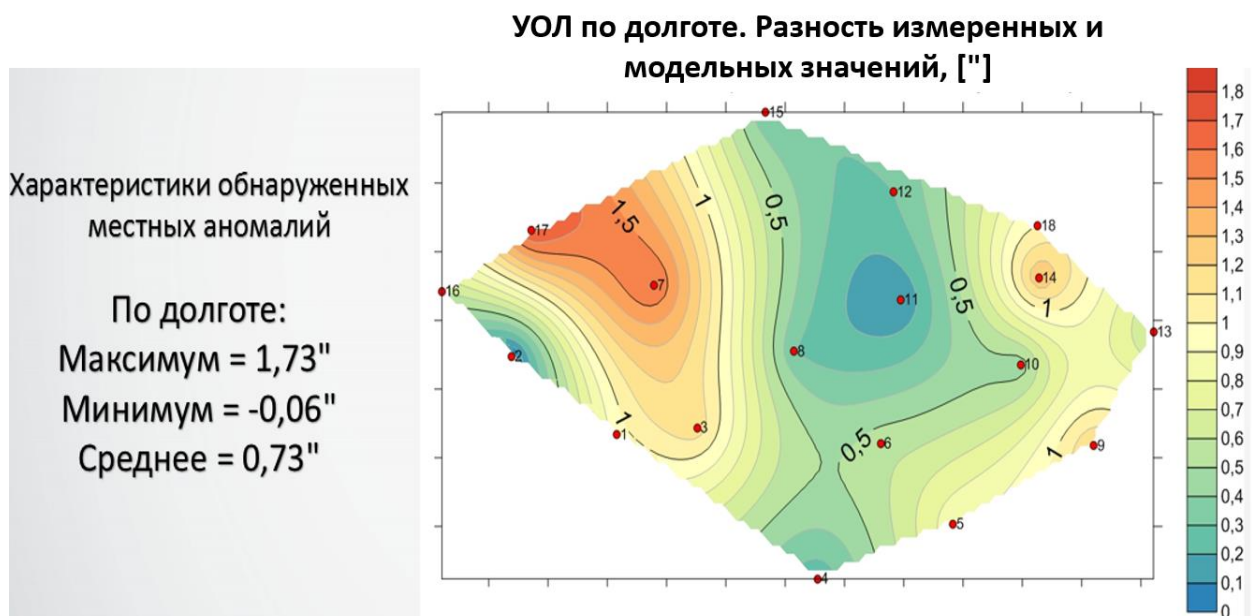
Рисунок 43. Измеренные значения составляющих УОЛ: а) по широте; б) по долготе

Как видно из этого рисунка, вследствие высокого разрешения карты наблюдаются локальные аномалии, которые в модели EGM2008 отсутствуют. Значение УОЛ по широте изменяется от минус 4,5" до плюс 2,3", а по долготе – от плюс 1,7" до плюс 4,7".

Разности между измеренными и модельными значениями составляющих УОЛ на высокодискретном полигоне представлены на рисунке 44 а, б.



а)



б)

Рисунок 44. Разность измеренных и модельных карт составляющих УОЛ: а) по широте; б) по долготе

Как видно из рисунка 44, разность измеренных и модельных значений УОЛ по широте изменяется от минус 2,31" до плюс 0,57" со средним значением минус 1,14", а по долготе – от минус 0,06" до плюс 1,73" со средним значением плюс 0,73". Следует заметить, что перепад высот для полигона составляет не более 60 м, т.е. местность равнинная. Таким образом, можно сделать вывод, что известная модель геопотенциала EGM2008 не позволяет отображать локальные анома-

лии УОЛ в связи с низкой разрешающей способностью - характерное расстояние между узловыми точками составляет не менее 18-20 км. Вместе с тем, измерения с помощью высокоточного измерителя УОЛ такую возможность предоставляют: согласно карте измеренных значений УОЛ (рисунок 43), на интервале ≈ 18 км выявлены несколько аномалий УОЛ.

Метод измерений, реализованный в астроизмерительном испытательном стенде, позволяет получить карту УОЛ с дискретностью, которая существенно выше, чем дискретность, предоставляемая самыми современными моделями ГПЗ. При этом одновременно обеспечивается высокая точность и оперативность.

Наличие локальных аномалий свидетельствует о перспективности применения карт измеренных значений УОЛ в интересах создания корреляционно-экстремальных систем навигации на основе использования аномального ГПЗ.

4.6.3 Расчет градиента по измеренным значениям УОЛ

При подготовке высокодискретной карты УОЛ по ГПЗ совместно с астроизмерительным испытательным стендом измерения ускорения свободного падения (УСП) g выполнялись с высокоточным относительным гравиметром Scintrex CG-5 на тех же точках. При известных значениях составляющие УОЛ ξ, η и УСП g , компоненты вектора силы тяжести g_x, g_y, g_z можно найти по следующим формулам [113]:

$$\begin{aligned} g_x &\approx -g \cdot \xi, \\ g_y &\approx -g \cdot \eta, \\ g_z &\approx \sqrt{g^2 - g_x^2 - g_y^2}, \end{aligned}$$

где g – измеренное значение силы тяжести.

Знак минус означает, что значения УОЛ в сторону возрастания координат считается отрицательным.

При известных значениях g_x, g_y, g_z градиенты силы тяжести $W_{xx}, W_{yy}, W_{xy}, W_{zy}, W_{zx}$ для навигационно-гравиметрической карты можно рассчитать по следующим формулам:

$$W_{xx} \approx \frac{\Delta g_x}{\Delta x}, \quad W_{yy} \approx \frac{\Delta g_y}{\Delta y}, \quad W_{xy} = \frac{\Delta g_x}{\Delta y}, \quad W_{zx} = \frac{\Delta g_z}{\Delta x}, \quad W_{zy} = \frac{\Delta g_z}{\Delta y}.$$

Измерения с гравиметром на разных высотах позволяют восстановить вертикальный градиент силы тяжести W_{zz} .

Таким образом, выполнение совместных измерений с астроизмерителем и высокоточным относительным гравиметром позволит восстановить все компоненты градиента силы тяжести и построить многослойную навигационно-гравиметрическую карту, содержащую слои УОЛ, ускорения свободного падения, а также 5 слоев гравитационных градиентов. При этом погрешность определения УОЛ в 0,2" соответствует погрешности определения градиентов силы тяжести на уровне 10 Этвеш, что потенциально недостижимо с использованием моделей геопотенциала ГПЗ.

4.7 Использование измерений УОЛ при подготовке эталонного маршрута навигации на московской гравитационной аномалии

4.7.1 Исследования Б.Я. Швейцера

В 1862 г. из стен типографии Московского университета вышла книга «Исследование местной аттракции, существующей около Москвы». Эта книга, посвященная анализу аномалий силы тяготения, обнаруженных в окрестностях Москвы, была написана профессором астрономии Московского университета Богданом Яковлевичем Швейцером [131]. Эта небольшая по объему книжка вскоре после выхода из печати была удостоена золотой медали Русского географического общества и получила мировую известность.

Авантитул книги занимает посвящение «Его Превосходительству господину Управляющему Межевым корпусом Михаилу Николаевичу Муравьеву». В нем профессор астрономии Московского университета Богдан Яковлевич Швейцер кратко сформулировал для своего непосредственного начальника результаты проведенного исследования. «...В моем сочинении я оправдал Ваше доверие и неоспоримо доказал, что в Московской губернии существует необыкновенное от-

клонение отвеса, производимое замечательно-неравномерным распределением масс большей и меньшей плотности под поверхностью земли, - пишет Швейцер. - В этом отношении исполненные уже нами работы могут служить, по крайней мере, хорошим началом и доказательством того, что неправильности под поверхностью земли простираются по большей части Московской губернии и, быть может, выходят из ее пределов».

Первые измерения УОЛ по широте Б.Я. Швейцер провел в 1848 г. (в то время существовала возможность определения только этой составляющей УОЛ). Затем в ходе организованных им экспедиций 1853, 1858 и 1859 гг. Б.Я. Швейцер при содействии студентов Межевого института осуществил детальную гравиметрическую съемку территории Московской губернии. А в 1862 г. в уже упоминавшийся монографии «Исследования местной аттракции» опубликовал математически обработанные итоги этой съемки, включающие карту УОЛ. При этом Б.Я. Швейцер обнаружил, что линия нулевых значений УОЛ проходит на 12 км южнее центра Москвы, почти по параллели. Симметрично по отношению к этой линии на расстоянии ± 12 км от нее проходят линии положительных (к северу) и отрицательных (к югу) максимумов уклонений. При этом погрешность определения УОЛ составляет 1". При этом следует заметить, что знаки УОЛ, используемые в работах Б.Я. Швейцера, противоположны принятым в сегодняшней геодезии.

4.7.2 Подготовка маршрута навигации с помощью астроизмерителя

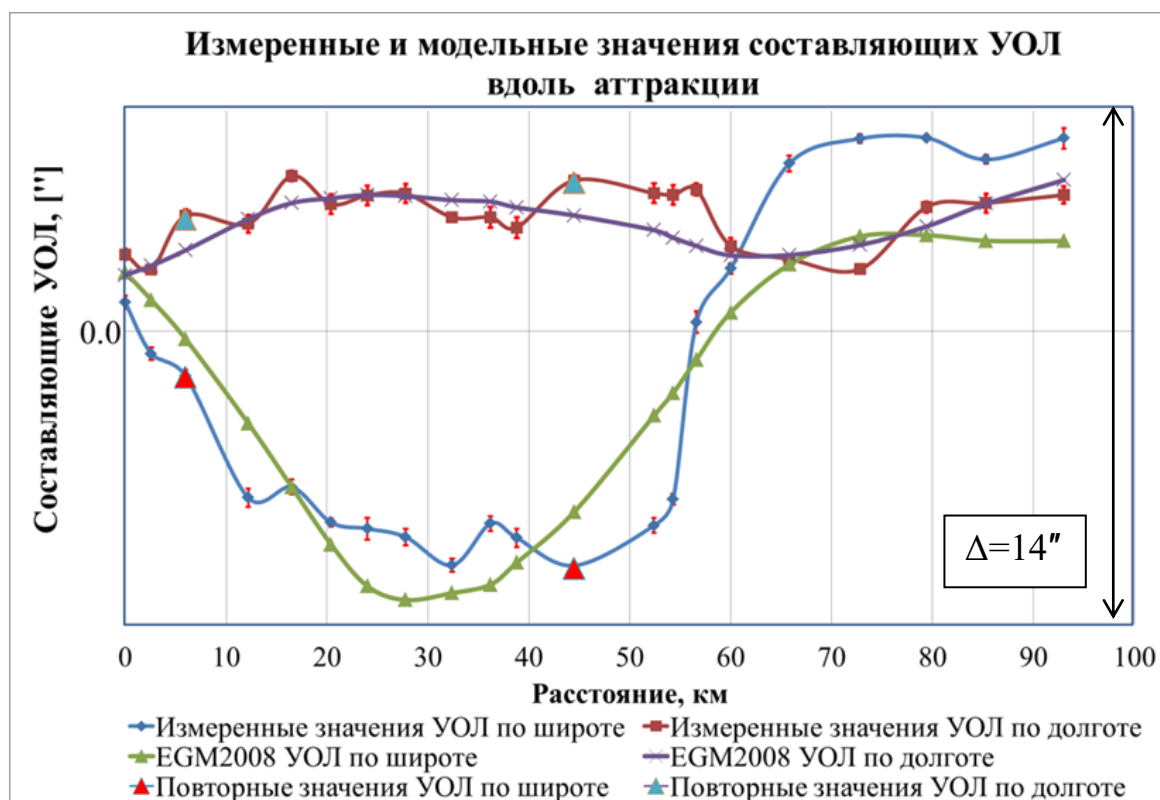
Московскую аттракцию в силу ее выраженной аномальности целесообразно использовать при подготовке маршрута навигации по ГПЗ.

Значения УОЛ Московской аттракции уточнены с помощью астроизмерительного стенда летом 2019 г. По результатам измерений построен профиль УОЛ вдоль линии, пересекающей аттракцию с севера на юг. Профиль состоит из 21 точки со средним расстоянием 4,5 км между ними. Для точек профиля перед измерениями вычислены значения УОЛ по глобальной модели геопотенциала EGM2008. На двух точках профиля аттракции проведены контрольные повторя-

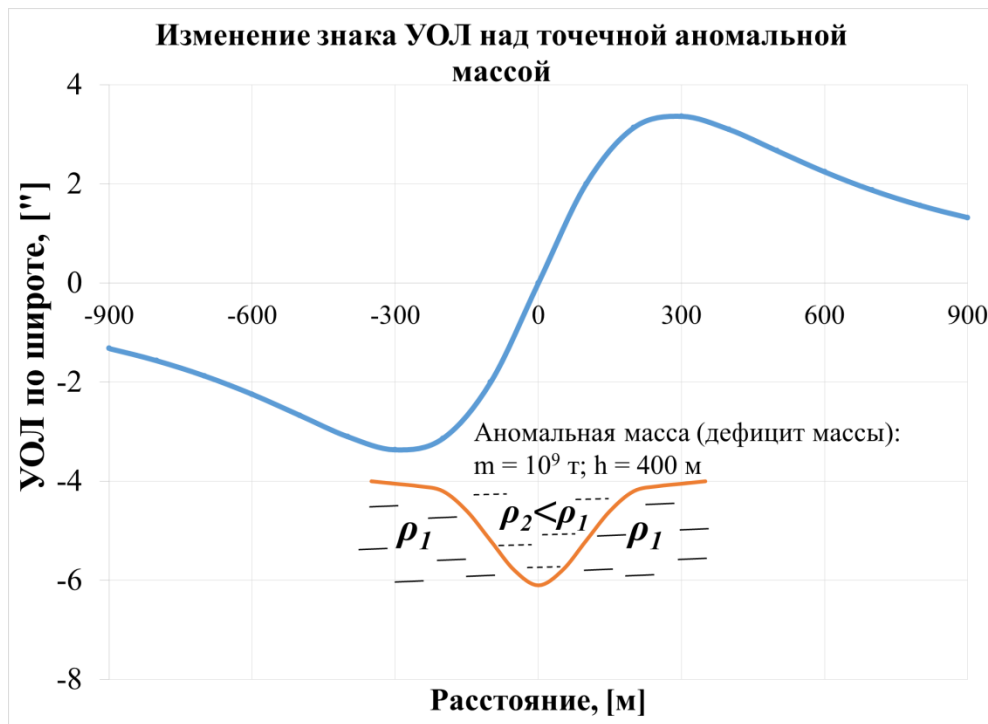
ющиеся наблюдения. При этом получено, что разность УОЛ на первой точке составляет 0,08" по широте и 0,04" по долготе, а во второй точке – 0,03" и 0,1", соответственно.

В соответствии с геологическим строением аттракции, гравитационная аномалия вызвана наличием длинного разлома в кристаллической платформе, на которой находится Московская область [132]. Плотность вещества платформы равна $2,7 \text{ г/см}^3$, а плотность осадочных пород, которыми сверху покрыта платформа и которыми заполнен разлом, составляет $2,2 - 2,3 \text{ г/см}^3$. Вследствие этого, отвесная линия, находящийся над разломом, отклоняется к одному и другому его краю, что приводит к возникновению положительных и отрицательных максимумов и расположенной между ними линии нулевых отклонений.

На рисунке 45 а) показаны графики измеренных и модельных значений УОЛ вдоль профиля аттракции, а на рисунке 45 б) – пример изменения знака УОЛ над простейшей моделью точечной аномальной массы [2].



а)



б)

Рисунок 45. УОЛ по широте: а) измеренный и модельный профили УОЛ; б) пример изменения знака УОЛ над точечной аномальной массой

Как видно из рисунка 45 а, профили УОЛ, построенные по модели геопотенциала сглаженные, в то время как измеренная карта показывает более изрезанное распределение УОЛ вдоль профиля, что говорит о перспективности применения созданного маршрута для целей навигации по ГПЗ. Сравнение рисунков 45 а) и б) говорит о согласованности измеренных значений УОЛ с геологической структурой Московской аттракции.

На рисунке 46 показаны разности УОЛ между профилями.

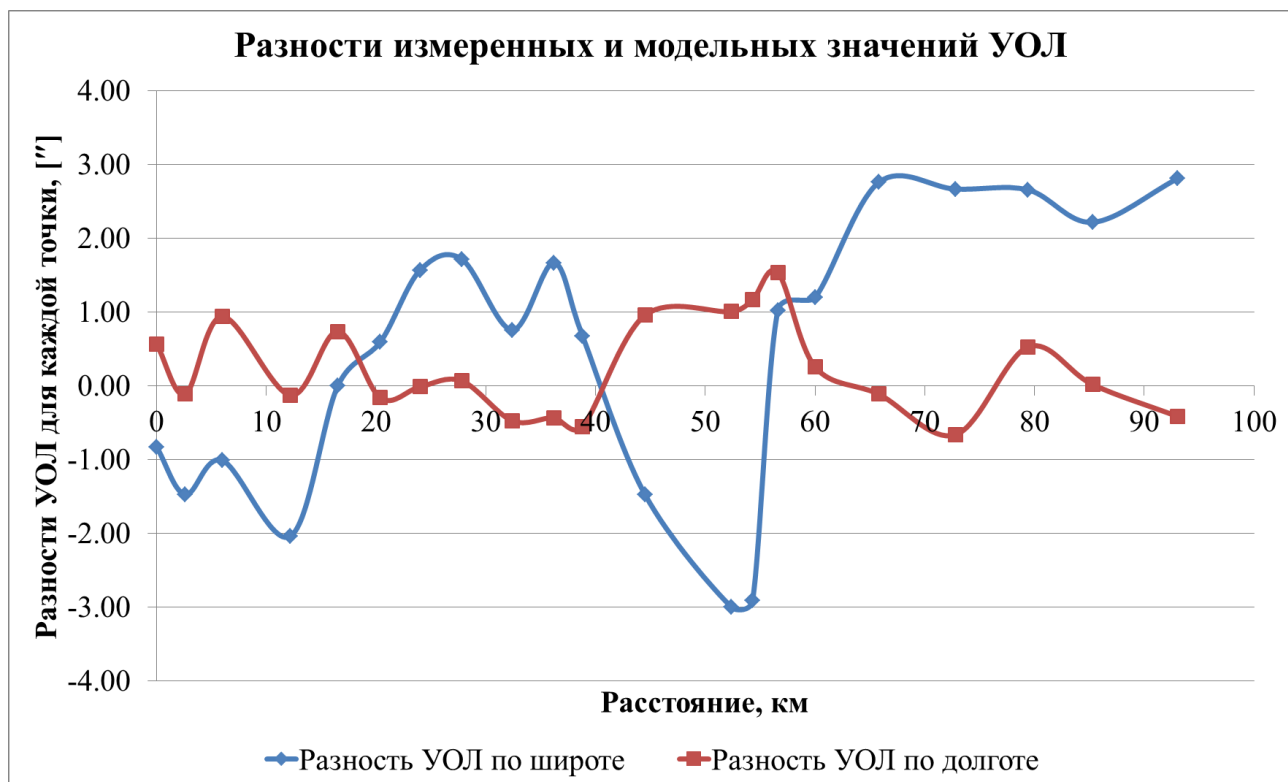


Рисунок 46. Разности УОЛ между измеренным и модельным профилями

Как видно из рисунка 46, наблюдается существенная разность между измеренными и модельными значениями УОЛ. Эта разность по широте изменяется от минус 3" до плюс 2,8" с СКО 1,9", а по долготе - от минус 0,66" до плюс 1,54" с СКО 0,64". Характерно, что наибольшее расхождение с моделью происходит дважды, по обе стороны от места, где составляющая УОЛ в меридиане меняет знак – между 50 и 60 км профиля (см. рисунок 45 а).

4.7.3 Сравнение измерений с картой Б.Я. Швейцера

Выполнение непосредственных сравнений измеренных значений УОЛ со значениями, полученными по карте Б.Я. Швейцера, является затруднительным по нескольким причинам:

1) на карте Б.Я. Швейцера приводятся названия населенных пунктов, в которых проводились наблюдения. Но даже при возможности их идентифицировать на современной местности, у нас нет информации о точном местоположении самого измерительного пункта. Некоторые населенные пункты вошли со временем

в состав Москвы и городов-спутников, многие населенные пункты значительно увеличились в размерах – т.е. непосредственное выполнение наблюдений внутри населенных пунктов стало невозможно из-за засветки;

2) значения УОЛ на карте Б.Я. Швейцера приведены относительно эллипсоида Бесселя. Прямой пересчет значений УОЛ затруднен в связи с неопределенностью надёжных параметров их пересчета в систему координат ПЗ-90.11.

Однако параметром, не зависящим от выбора системы координат, является разность между минимальным и максимальным значениями УОЛ на идентифицированных точках вдоль маршрута. В таблице 24 представлены измеренное, модельное и полученное по карте Б.Я. Швейцера минимальное и максимальное значения УОЛ на идентифицированных точках вдоль измеренного профиля.

Таблица 24. Измеренное, модельное и полученное по карте Б.Я. Швейцера минимальное и максимальное значения УОЛ на идентифицированных точках вдоль измеренного профиля

Вид профиля	Измеренный профиль	Модельный профиль	Профиль по карте Б.Я. Швейцера
Разброс	10,8"	5,8"	11,2"

Из таблицы 24 видно, что значения УОЛ, полученные из измерений - Б.Я. Швейцером и с астроизмерителем, согласуются друг с другом лучше, чем с глобальной моделью.

4.8 Создание комплекса средств метрологического обеспечения астроизмерителей

Для организации наблюдений, испытаний, сличений и метрологического обеспечения астроизмерителей предложен и создан комплекс средств метрологического обеспечения астроизмерителей (далее КСМО) [133]. Комплекс включает:

- 1) астрономический павильон, который выполнен в виде блок-контейнера;
- 2) железобетонные постаменты, заглубленные на 2 м, для обеспечения устойчивости при наблюдениях;

3) необходимые технические условия (электропитание, освещение и т.д.) (рисунок 47).



а)



б)

Рисунок 47. Комплекс средств метрологического обеспечения астроизмерителей:

а) общий вид; б) вид изнутри

Главной составляющей КСМО является макет астроизмерителя, оснащенный новым методом измерений. Данный комплекс обладает следующими преимуществами:

- наличие устойчивых железобетонных постаментов, заглубленных ниже глубины промерзания, позволяет выполнить долговременные наблюдения для детального определения составляющих погрешностей;

- необходимость нескольких постаментов обусловлена тем, что для выполнения наблюдений с астроизмерителем требуются определенные погодные условия, а именно, ясная звездная ночь. Наличие трех постаментов позволит одновременно выполнить наблюдения с несколькими приборами;

- наличие КСМО позволит выполнить сличения до трех астроизмерителей одновременно, что будет являться независимым методом для подтверждения их метрологических характеристик, а также позволит определить систематические погрешности.

Постоянное размещение астроизмерителя внутри КСМО, в котором температура равна температуре окружающей среды, позволит оперативно выполнять

наблюдения и избежать затрат времени на подготовку к измерениям. Дело в том, что при хранении астроизмерителя в теплом помещении для выполнения наблюдений необходимо заранее прибор выносить на улицу и ждать температурного равновесия между прибором и окружающей средой. Данная процедура может занимать до 1 часа. Особенно это актуально зимой, когда на улице минусовая температура. При таких условиях оптическая система телескопа может запотеть, а в крайнем случае, может и обледенеть (что наблюдалось с макетом астроизмерителя). Это ведет к невозможности выполнения наблюдений.

4.9 Выводы по главе 4

1) Для моделирования нового метода измерений с астроизмерителем разработана программно-математическая модель (ПММ). Она предназначена для моделирования кадра звездного неба, работы инклинометра и ГНСС-приемника в части временной привязки. Правильность алгоритмов ПММ подтверждена с использованием независимого программного обеспечения Astrometry. Данные моделирования использовались для тестирования, отладки, верификации и проверки работоспособности алгоритмов обработки разработанного метода в лабораторных условиях. Это позволило внедрить алгоритмы нового метода в испытательный стенд и приступить к непосредственным испытаниям в полевых условиях.

2) Создан астроизмерительный испытательный стенд на основе макета астроизмерителя УОЛ. Для повышения эффективности астрономических наблюдений (устранение «паразитной» боковой засветки, препятствие образованию росы и обледенению объектива телескопа в зимнее время) предложено использование бленды. Показано, для обеспечения жесткости системы необходимо непосредственное прикрепление инклинометра к телескопу.

3) Проведена оценка точности вычислений УОЛ в зависимости от выбора звездного каталога, метода определения координат центров звезд и метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу. Установлено, что их суммарное влияние не превышает 0,03".

4) Выявлено неконтролируемое изменение калибровочных коэффициентов астроизмерителя между сериями наблюдений в течение наблюдений в одной точке, что 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 одной точке. Это и выполняется в предложенном методе, что еще раз подтверждает целесообразность ее использования.

5) Проведены испытания предложенного метода на астроизмерительном испытательном стенде в полевых условиях на пяти географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях в течение 16 наблюдательных ночей в 2018 г. Испытания в каждой точке состояли из серии измерений по два цикла. Каждый цикл включал 12 стационарных положений телескопа в горизонтальной плоскости (итого 24 положения телескопа).

Результаты испытаний подтвердили повышение оперативности, точности и производительности измерений УОЛ:

- время проведения измерений в точке сокращается от 1,5 ч до 30 минут;
- среднее квадратическое отклонение измерений снижено до 0,2";
- производительность измерений повышена до 5-8 точек за ночь.

6) При подготовке высокодискретной карты ГПЗ на полигоне, состоящем из 18 точек с расстоянием 3-5 км друг от друга, обнаружены существенные локальные аномалии УОЛ, характеризующую тонкую структуру ГПЗ, которые в модели геопотенциала EGM2008 отсутствуют.

7) В процессе подготовки эталонного маршрута навигации по ГПЗ впервые уточнены значения УОЛ на московской гравитационной аномалии. Погрешность измерений, по сравнению с опубликованными значениями, уменьшена с 1" до 0,2".

8) Предложен и реализован метрологический павильон для организации сличений одновременно до трех астроизмерителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе содержится решение актуальной научной задачи, заключающейся в повышении точности, оперативности и производительности измерений уклонений отвесной линии.

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1) Выполнен обзор известных методов измерения УОЛ, их точностные характеристики и основные недостатки. Проведенный в обзоре анализ показывает, что на сегодняшний день астрономо-геодезический метод определения УОЛ, который реализуется в астроизмерителях, превосходит остальные методы как по точностным характеристикам, так и оперативности, что говорит о перспективности этих приборов.

Рассмотрены существующие реализации астроизмерителей УОЛ, их метод измерений (традиционный метод) и основные математические соотношения астрономо-геодезического метода определения УОЛ.

В целом, в процессе анализа выявлено следующее:

1. гравиметрический и спутниковый дифференциальный методы определения УОЛ обладают низкой оперативностью и невысокой точностью;
2. метод определения УОЛ с использованием моделей ГПЗ обладает низкой точностью и низкой разрешающей способностью (18-20 км), что не позволяет изучить тонкую структуру распределения УОЛ;
3. традиционный метод измерений, используемый в существующих астроизмерителях, обладает следующими недостатками:
 - калибровочные коэффициенты астроизмерителя необходимо определять перед началом измерений. Время, затрачиваемое на процедуру определения калибровочных коэффициентов, составляет около 30 минут;
 - калибровочные коэффициенты изменяются между сериями наблюдений, что вносит дополнительную погрешность в результаты наблюдений;
 - необходимо обеспечить высокую точность разворота телескопа в горизонтальной плоскости;

– для обеспечения жесткости горизонтальной плоскости месторазмещения астроизмерителя необходимо использование специального основания (бетонного, металлического и др.).

2) Предложен новый метод измерений УОЛ с астроизмерителем. В отличие от традиционного метода, он позволяет учитывать изменение калибровочных коэффициентов астроизмерителя между сериями измерений. Он предполагает в единичной серии измерений получение кадров звездного неба и значений показаний инклинометра при разных наклонах телескопа. Измерения в каждой серии могут выполняться в произвольных направлениях оптической оси телескопа и произвольных углах в горизонтальной плоскости и отличаться от серии к серии. Предложенный метод измерений не требует устройства специального жесткого измерительного бетонного основания и высокоточного измерения угла поворота телескопа в горизонтальной плоскости.

В связи с этим преимущества разработанного метода состоят в следующем:

1. В каждой серии измерений происходит одновременное оценивание и учет всех калибровочных коэффициентов астроизмерителя, т.е. происходит «автокалибровка» прибора. Это позволяет избежать дополнительных погрешностей, вызванных изменением калибровочных коэффициентов между сериями измерений.

2. Процесс «автокалибровки» астроизмерителя повышает оперативность измерений УОЛ в силу отсутствия необходимости определения калибровочных коэффициентов перед началом измерений в каждой точке.

3. 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.

4. Снимаются требования к обеспечению жесткости основания, на котором размещается астроизмеритель. Это позволяет выполнять наблюдения на любом неподготовленном твердом основании (грунтовые, асфальтовые дороги и площадки). Это особенно важно при измерениях в полевых условиях.

3) Для моделирования нового метода разработана программно-математическая модель астроизмерителя (ПММ). Она предназначена для моделирования кадра звездного неба, работы инклинометра и ГНСС-приемника в части временной привязки. Правильность алгоритмов ПММ подтверждалась с использованием независимого программного обеспечения Astrometry. Данные моделирования использовались для тестирования, отладки, верификации и проверки работоспособности алгоритмов обработки нового метода в лабораторных условиях. Это позволило использовать алгоритмы нового метода при непосредственных испытаниях в условиях реального звездного неба.

4) Создан астроизмерительный испытательный стенд на основе макета астроизмерителя для испытания нового метода в полевых условиях. Полевые испытания метода проводились в различных географических точках северо-запада России.

5) В процессе испытаний нового метода рассмотрены:

– четыре высокоточных звездных каталога: Tycho-2, UCAC4, PPMXL и GAIA DR2;

– три метода определения координат центров звезд: метод центра тяжести, метод функции рассеяния точки и метод аппроксимации формы звезды параболоидом;

– четыре метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу: аффинный и полином 2-ой, 3-ей и 4-ой степени.

6) Проведена оценка точности вычисления УОЛ в зависимости от выбора звездного каталога, метода определения координат центров звезд и метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу. Установлено, что их суммарное влияние не превышает 0,03".

7) Выявлено неконтролируемое изменение калибровочных коэффициентов астроизмерителя между сериями наблюдений в течение наблюдений в одной точке, что приводит к смещению значений УОЛ, т.е. к появлению дополнительной погрешности вычислений УОЛ. Это подтверждает необходимость уточнения зна-

чений калибровочных коэффициентов в каждой серии в течение наблюдений в одной точке. Это и выполняется в предложенном методе, что еще раз подтверждает целесообразность ее использования.

8) Проведены испытания предложенного метода с помощью созданного астроизмерительного испытательного стенда в полевых условиях на пяти географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях в течение 16 наблюдательных ночей в 2018 г. Результаты испытаний подтвердили повышение оперативности, производительности и точности измерений УОЛ:

- время проведения измерений в точке сокращается от 1,5 ч до 30 минут;
- среднее квадратическое отклонение измерений снижено до 0,2";
- производительность измерений повышена до 5-8 точек за ночь.

9) При подготовке высокодискретной карты ГПЗ на полигоне в Московской области, состоящем из 18 точек с расстоянием 3-5 км друг от друга, обнаружены существенные локальные аномалии УОЛ, характеризующую тонкую структуру ГПЗ, которые в модели геопотенциала EGM2008 отсутствуют.

10) Измерения на Московской аттракции рекомендовано использовать при подготовке эталонного маршрута навигации по аномальному ГПЗ. Впервые уточнены значения УОЛ на московской гравитационной аномалии. Погрешность измерений по сравнению с опубликованными значениями уменьшена с 1" до 0,2".

Таким образом, все поставленные частные научные задачи решены, цель диссертационной работы достигнута.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

AP	Аномальная рефракция
АРМ	Автоматизированное рабочее место оператора
ГНСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ГПЗ	Гравитационное поле Земли
МАС	Международный астрономический союз
МСВЗ	Международная служба вращения Земли
ОПУ	Опорно-поворотное устройство
ПЗС	Прибор с зарядовой связью
ПММ	Программно-математическая модель
СК	Система координат
СКО	Среднее квадратическое отклонение
УОЛ	Уклонение отвесной линии
CIRS	Небесная промежуточная система координат (Celestial Intermediate Reference System)
GCRS	Геоцентрическая небесная система координат (Geocentric Celestial Reference System)
GAST	Гринвичское истинное звездное время (Greenwich Apparent Sidereal Time)
IAU	Международный астрономический союз (International Astronomical Union)

ITRS	Международная Земная система координат (International Terrestrial Reference System)
ICRS	Международная Небесная система координат (International Celestial Reference System)
NTP	Протокол сетевого времени (Network Time Protocol)
TT	Земное время (Terrestrial Time)
UTC	Всемирное координированное время (Coordinated Universal Time)

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Torge, W. (2001). *Geodesy*, 3rd Ed., Walter de Gruyter, Hawthorne, N.Y
2. Л.В. Огородова. *Высшая геодезия*. М.: Геодезкартиздат, 2006.
3. *Гравиметрия: учеб.-метод. комплекс для студ. спец. 1-56 01 02 «Геодезия» / сост. и общ. ред. Г. А. Шароглазовой*. – Новополюцк: ПГУ, 2006 – 196 с. ISBN 985-418-452-8
4. Непоклонов В.Б. Методики определения составляющих уклонений отвесных линий и высот квазигеоида по гравиметрическим данным // *Гравиметрия и геодезия* (отв. Ред. Б.В. Бровара). М.: Научный мир, 2010. С. 455-464.
5. Ayhan Ceylan. Determination of the deflection of vertical components via GPS and leveling measurement: A case study of a GPS test network in Konya, Turkey // *Scientific Research and Essay Vol.4* (12), pp. 1438-1444, December, 2009.
6. К.М. Антонович. *Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии*. М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005.
7. А.А. Цуриков. Исследование точности определения астрономо-геодезических уклонений отвеса с применением GPS, ГЛОНАСС-технологий. *Научный журнал Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка»*, № 2, 2012, с. 13-16.
8. Jekeli, C. (1999). "An analysis of vertical deflections derived from high-degree spherical harmonic models." *J. Geodesy*, 73(1), 10–22.
9. В.Б. Непоклонов. Об использовании новых моделей гравитационного поля земли в автоматизированных технологиях изысканий и проектирования. // *Автоматизированные технологии изысканий и проектирования*. 2009. №2,3.
10. Конешов В.Н., Непоклонов В.Б., Столяров И.А. Об использовании современных моделей геопотенциала для исследования уклонений отвесных линий в Арктике // *Гироскопия и навигация*. 2012. №2. С. 44-55.
11. Hirt C., Marti U., Burki B., Featherstone W. E. Assessment of EGM2008 in Europe using accurate astrogeodetic vertical deflections and omission error estimates from SRTM/DTM2006.0 residual terrain model data // *Journal of geophysical research* – 2010 – Vol. 115

12. Анучин О.Н. Инерциальные методы определения параметров гравитационного поля Земли на море. Дис. ... докт. техн. наук. 05.11.03 / О.Н. Анучин. СПб, 1992. 425 с.
13. Badekas J., Mueller I. Interpolation of the Vertical Deflection from Horizontal Gravity Gradients. *Journal of Geophysical Research*. Volume 13. 1968. № 22. Pp. 6869-6878.
14. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли / Под общей редакцией академика РАН В.Г. Пешехонова; науч. редактор д.т.н. О.А. Степанов. – СПб.: ГНЦ РФ АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2017. – 290 с. ISBN 978-5-91995-049-3
15. Жаров В. Е. Сферическая астрономия. — Фрязино, 2006. — 480 с. ISBN 5–85099–168–9.
16. Мурзабеков М.М., [Копаев А.В.], Фатеев В.Ф. Метрологические характеристики астрогеодезического измерителя уклонов отвесной линии на основе цифрового зенитного телескопа // *Геодезия и картография*. 2016. № 4. С. 10-17.
17. Абакумов В.М. Особенности измерения угловых координат звезд прецизионными оптико-электронными системами // *Опт. Журн.* 1996. № 7.
18. Брумберг В.А., Глебова Н.И., Лукашова М.В., Малков А.А., Питьева Е.В., Румянцева Л.И., Свешников М.Л., Фурсенко М.А. Расширенное объяснение к «Астрономическому ежегоднику» // *Труды ИПА РАН*. Вып. 10. СПб.: ИПА РАН, 2004.
19. Hirt, C. (2004). “Entwicklung und Erprobung eines digitalen Zenitkameranystems für die hochpräzise Lotabweichungsbestimmung“. Ph.D. Thesis, Wissen. Arb. der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik ander Universität Hannover Nr. 253.
20. Bretterbauer, K., 1975. Über mögliche Refraktionsanomalien infolge von Schichtenneigungen. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen*, 53(4): 113-119
21. Buil, C. 1991. CCD Astronomy: Construction and use of an astronomical CCD camera, Willmann-Bell, Richmond, Va.
22. Howell, S. B. 2000. Handbook of CCD-astronomy, Cambridge University Press, Cambridge

23. Hirt, C., and Seeber, G. (2008). "Accuracy analysis of vertical deflection data observed with the Hannover digital zenith camera system TZK2-D." *J. Geodesy*, 82(6), 347–356.
24. Somieski, A. (2008). "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.
25. Hirt, C., Bürki, Somieski, A., Seeber, G. (2010). "Modern Determination of Vertical Deflections Using Digital Zenith Cameras", *JOURNAL OF SURVEYING ENGINEERING © ASCE / FEBRUARY 2010*. 136:1-12.
26. Hirt, C. (2001). "Automatic determination of vertical deflections in real time by combining GPS and digital zenith camera for solving the GPS-height-problem." *Proc., 14th Int. Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Institute of Navigation, Alexandria*, 2540–2551.
27. Hirt, C., and Bürki, B., (2002). "The digital zenith camera—A new high precision and economic astrogeodetic observation system for realtime measurement of deflections of the vertical." *Proc., 3rd Meeting of the Int. Gravity and Geoid Commission of the IAG, I. Tziavos, ed., Thessaloniki*, 161–166.
28. Hirt, C., Bürki, B., (2006). «Status of Geodetic Astronomy at the Beginning of the 21st Century». *Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik der Universität Hannover Nr. 258*: 81-99.
29. Müller A., Bürki B., Kahle HG., Hirt C., Marti U. (2005) First Results from new High-precision Measurements of Deflections of the Vertical in Switzerland. In: Jekeli C., Bastos L., Fernandes J. (eds) *Gravity, Geoid and Space Missions. International Association of Geodesy Symposia*, vol 129. Springer, Berlin, Heidelberg.
30. Müller, A., Bürki, B., Limpach, P., Kahle, H.-G. Grigoriadis, V. N., Vergos, G. S., Tziavos, I. N. Validation of marine geoid models in the North Aegean Sea using satellite altimetry, marine GPS data and astrogeodetic measurements. *Gravity Field of the Earth: proceedings of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service*, 28 August - 1 September, 2006, Istanbul, Turkey.

31. Hirt, C., Seeber G., (2007). «High-Resolution Local Gravity Field Determination at the Sub-Millimeter Level using a Digital Zenith Camera System». Dynamic Planet. Volume 130 of the series International Association of Geodesy Symposia. pp 316-321.
32. Halicioğlu, K., Deniz, R., Ozener, H., (2015). «Determining astro-geodetic deflections of the vertical using digital zenith camera system». 26th IUGG General Assembly 2015, Prague.
33. Bertin, E. 2006. Sextractor Users Manual. Paris: Institut d'Astrophysique & Observatoire de Paris.
34. Lang, Dustin, David W. Hogg, Keir Mierle, Michael Blanton, and Sam Roweis. 2010. "Astrometry Net: Blind Astrometric Calibration of Arbitrary Astronomical Images." The Astronomical Journal 139 (5): 1782-1800
35. Bangert, J., W. Puatua, G. Kaplan, J. Bartlett, W. Harris, A. Fredericks, and A. Monet. 2011. User's Guide to NOVAS Version C3.1. Washington, DC: USNO.
36. <http://pinpoint.dc3.com/> - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
37. Māris.Abele, Jānis.Balodis, Inese.Janpaule, Ieva Lasmane, Augusts.Rubans, Ansis.Zariņš (2012). «Digital zenith camera for vertical deflection determination». Geodesy and Cartography 12/2012; 38(4). DOI: 10.3846/20296991.2012.755324
38. Kudrys, J., (2009). «Automatic determination of the deflections of the vertical – first scientific results». Acta Geodyn. Geomater., Vol. 6, No. 3 (155), 233-238, 2009.
39. Гайворонский С.В., Кузьмина Н.В., Цодокова В.В. Автоматизированный зенитный телескоп для решения астрономо-геодезических задач // Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции, 14-15 февраля 2017 г., Менделеево. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2017, ил. 185, табл. 41, библи. 297, 362 с., 197-205 с.
40. Bo Wang, Lili Tian, Zheng Wang, Zhiqiang Yin, Weidong Liu, Qiyuan Qiao, Hongqi Wang, Yanben Han, (2014). Image and data processing of digital zenith telescope (DZT-1) of China. Science China Press and Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014.
41. Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино, «Век 2», 2004.

42. Seidelmann, P. (1992). Explanatory supplement to the Astronomical Almanac. University Science Books, Mill Valley, CA.
43. <https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
44. Цветков А.С. Руководство по работе с каталогом Tycho-2: учебно-метод. пособие. – СПб., 2005. – 132 с.
45. Høg, E., F. C., Makarov, V., Urban, S., Corbin, T., Wycoff, G., Bastian, U., Schwekendiek, P., and Wicenec, A. (2000). The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars. *Astronomy and Astrophysics*, 355:27–30.
46. <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=I/259&-to=3> электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
47. <https://heasarc.nasa.gov/W3Browse/all/tycho2.html> электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
48. Zacharias, N.; Finch, C. T.; Girard, T. M.; Henden, A.; Bartlett, J. L.; Monet, D. G.; Zacharias, M. I. (2013). The Fourth US Naval Observatory CCD Astrograph Catalog (UCAC4). *The Astronomical Journal*, Volume 145, Issue 2, article id. 44, 14 pp. (2013).
49. <http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=I/322A&-to=3> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
50. <http://www.usno.navy.mil/USNO/astrometry/optical-IR-prod/ucac> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
51. S. Roeser, M. Demleitner, E. Schilbach. The PPMXL catalog of positions and proper motions on the ICRS. Combining USNO-B1.0 and 2MASS. Submitted to *Astronomical J.* DOI: 10.1088/0004-6256/139/6/2440
52. <http://cdsarc.u-strasbg.fr/viz-bin/Cat?I/317> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
53. <https://irsa.ipac.caltech.edu/Missions/ppmxml.html> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
54. <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/dr2> - электронный ресурс. Проверено 30.09.2019 г.

55. Haralick, R. M., and Shapiro, L. G. 1992. *Computer and robot vision*, Vol. 1/2, Addison-Wesley, Reading, Mass.
56. Fosu C. Determination of centroid of CCD star images / C. Fosu, G W. Hein, B. Eissfeller // XX ISPRS Congress, Istanbul, Turkey.– July 12-23, 2004.– P. 612–617
57. 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.
58. Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. М.: Техносфера, 2006.
59. Манцветов А.А., Соколов А.В., Умников Д.В., Цыпулин А.К. Измерения координат специально формируемых оптических сигналов // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2006. № 2.
60. Якушенков Ю.Г., Соломатин В.А. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Известия ВУЗов. Приборостроение. 1986. № 9. С. 62-69.
61. Gayvoronsky S., Rusin E., Tsodokova V. A comparative analysis of methods for determining star image coordinates in the photodetector plane // Automation & Control: Proceeding of the International Conference of Young Scientistst. November 2013. Spb: St. Petersburg State Polytechnical University, 2013. P. 54-58.
62. Брагин А.А. Исследование способов определения координат центра изображения точечного источника излучения. Известия ВУЗов, «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК, 2009. Стр. 73-80.
63. Sandrine T. Optimized centroid computing in a Shack-Hartmann sensor // SPIE, October 2004. pp. 50-59.
64. Akondi Vyas, Roopashree M.B., Prasad B.R. Performance of Centroiding Algorithms at Low Light Level Conditions in Adaptive Optics. Bangalore. 2009.
65. Курманбек уулу Талантбек. Обнаружение и определение координат движущихся точечных объектов в последовательности изображений. Новосибирск. 2009. 110 с.

66. Блажко С.Н. Курс практической астрономии. М.: Наука, 1979.
67. Gessler J., (1975), Entwicklung und Erprobung einer transportablen Zenitkamera für astronomisch-geodätische Ortsbestimmungen. Wiss. Arb. Lehrst. für Geod., Phot. und Kart. Techn. Univ. Hannover Nr. 60, Germany.
68. Гайворонский С.В., Русин Е.В., Цодокова В.В. Идентификация звезд при определении астрономических координат автоматизированным зенитным телескопом // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 1. С. 22–29.
69. Groth, E. J. (1986). A Pattern-Matching Algorithm For Two-Dimension Coordinate Lists. *Astronomical Journal*, 91:1244–1248.
70. Valdes, F. G., Campusano, L. E., Velásquez, J. D., and Stetson, P. B. (1995). FO-CAS Automatic Catalog Matching Algorithms. *PASP*, 107:1119–1128.
71. А. В. Иванов, Д. Ю. Пашенцев, Р. В. Тишкин. Алгоритмы идентификации звёздных узоров в задаче уточнения элементов внутреннего ориентирования. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета № 4 (35) 2012 г.
72. Уралов С.С. Курс геодезической астрономии: учебник для вузов. М.: Недра, 1980.
73. Гиенко Е.Г. Астрометрия и геодезическая астрономия: учеб. пособие. Новосибирск: СГГА, 2011.
74. Киселев А.А. Теоретические основания фотографической астрометрии. М.: Наука, 1989.
75. Степанов О.А. Основы теории оценивания с приложениями к задачам обработки навигационной информации. Часть 2. Введению в теорию фильтрации. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор» 2012. 417 с.
76. Моторин А.В., Цодокова В.В. Расчет характеристики точности в задаче оценивания параметров преобразования координат звезд // Известия Тульского государственного университета. Тула: Издательство ТулГУ, 2016. С. 129-141.

77. Лекции по метрологии [Текст] / А. С. Дойников. - Менделеево, Московская обл.: ВНИИФТРИ, 2018. - 291 с. : ил., табл.; 25 см.; ISBN 978-5-903232-69-7 : 500 экз.
78. <https://www.wylerag.com/en/products/inclination-measuring-sensors/digital-inclination-sensors/zerotronic-inclination-sensor/> - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
79. https://www.gfk-leica.ru/katalog/datchiki/leica_nivel_210/ - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
80. http://www.l-gm.de/en/en_tiltmeter.html - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
81. Ворошилов А.П. Геодезические работы в кадастровой деятельности / А.П. Ворошилов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, ЦДО, 2011 -126 с.
82. Астрономический ежегодник на 2014 год.–СПб.: Наука, 2013. – 683 с.
83. Kaplan, G. H., Hughes, J. A., Seidelmann, P. K., Smith, C. A., and Yallop, B. D. (1989). Mean and apparent place computations in the new IAU System. III. Apparent, Topocentric, and Astrometric Places of Planets and Stars. *Astronomical Journal*, 97:1197–1210.
84. Jekeli C (2006) Geometric reference systems in geodesy. Lecture notes of Division of Geodesy and Geospatial Science, School of Earth Science, Ohio State University.
85. <http://www.iausofa.org/> - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
86. http://aa.usno.navy.mil/software/novas/novas_c/ - электронный ресурс. Проверено 11.02.2020 г.
87. Пашков В.С., Красиков В.А., Перешивайлов Л.А. Анализ изображений звезд в оптико-электронных датчиках на ПЗС // *Оптико-электронные приборы и системы*, № 98, 1998.
88. Stone RC (1989) A comparison of digital centering algorithms. *Astron J* 97:1227–1237.
89. Li Z, Peng QY, Han GQ (2009) Comparison of digital centering algorithms based on CCD image. *Acta Astronomica Sinica* 50:340–348 (in Chinese).
90. Auer LH, Van Altena WF (1978) Digital image centering. II. *Astron J* 83:531–537

91. Peng QY, Han YB, Zhang CL et al (2003) Image-processing techniques in precisely measuring positions of Jupiter and its galilean satellites. *Astron Astrophys* 401:773–779
92. Peng QY, Vienne A, Lainey V et al (2008) New evidence of precision premium for Galilean satellites from CCD imaging. *Planet Space Sci* 56:1807–1811
93. Chiu LTG (1977) Astrometric techniques with a PDS microdensitometer. *Astron J* 82:842–848
94. Stetson PB (1979) Photographic stellar photometry with the PDS microdensitometer. *Astron J* 84:1056–1066
95. <http://www.hotechusa.com/category-s/23.htm> - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
96. Даффет-Смит П. Практическая астрономия с калькулятором. Пер. с. англ. — М.: Мир, 1982. — 176 с.
97. Stone, R.C. 1996. An accurate method for computing atmospheric refraction. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 108, 1051-1058.
98. Taylor, S., 2009. On the Sources of Astrometric Anomalous Refraction. *Dissertation*, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
99. Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрометрии. Учебное пособие. — Николаев: АТОЛЛ, 2000. — 104 с.: илл. ISBN 966-7726-14-2
100. Sugawa, C., 1956. On the Relation of the Anomalous Refraction on the Latitude Observations. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 8(1): 27-39.
101. Guillaume, S., 2011. Die Bedeutung des Schwerefeldes beim zukünftigen Linearbeschleuniger CLIC, Presented at Astronomisches Seminar, 11.04.2011, Astronomisches Institut, Universität Bern, Switzerland
102. <http://www.cosmo-model.org/> - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
103. Vondrák J., Ron C., Pesek I. and Cepek A. 1995. New global solution of Earth orientation parameters from optical astrometry in 1900-1990, *Astronomy and Astrophysics* 297, 899-906
104. Hirt, C., 2006. Monitoring and Analysis of Anomalous Refraction Using a Digital Zenith Camera System. *Astronomy and Astrophysics*, 459(1): 283-290. DOI: 10.1051/0004-6361:20065485

105. Ramsayer, K. (1967). "Investigation on errors in the determination of astronomical refraction." *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen* *Vermessungswesen Sonderheft*, 25, 260–269.
106. McCarthy, D.D. 1979. Some advantages and disadvantages of a photographic zenith tube. In: IAU Symposium Time and the Earth's rotation (Eds D.D McCarty and J.D. Pilkington), San Fernando, 1978, No 82, pp 65-66
107. Nakajima, K., 1979. Analysis of the Observational Errors of the Photographic Zenith Tube at the Tokyo Astronomical Observatory. *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 31: 775-799.
108. Stone, R.C., Monet, D.G., Monet, A.K.B., Walker, R.L., Ables, H.D., Bird, A.R. and Harris, F.H. 1996. The Flagstaff Astrometric Scanning Transit Telescope (FASTT) and Star Positions Determined in the Extragalactic Reference Frame. *Astronomical Journal*, 111(4), 1721-1742.
109. А.П. Кистерский, В.В. Лапаева, Ю.А. Нефедьев, М.В. Кутленков. Расчет малых величин уклонений местной отвесной линии, вызванных техногенными факторами. *Научно-технический журнал Георесурсы*. 2(34) 2010. С. 13-15.
110. Z.X. Li, H. Li, Y.F. Li, Y.B. Han. Non-tidal variations in the deflection of the vertical at Beijing Observatory. *Journal of Geodesy* (2005) 78: 588–593. DOI 10.1007/s00190-004-0421-2
111. Z.X. Li. Measurements of interannual variation of the vertical at Jozefoslaw by astrometric and gravimetric observations. *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 129, 353-355 (1998).
112. Hui Li, Guang-yu Fu, Zheng-xin Li. Plumb line deflection varied with obtained by repeated gravimetry // *ACTA SEISMOLOGICA SINICA*, 2001, Vol. 14 No. 1 pp 66-71. Article ID: 1000-9116 (2001) 01-0066-06.
113. Бровар В.В. Гравитационное поле в задачах инженерной геодезии. М., Недра, 1983, 112 с.
114. https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote36/tn36_043.pdf;jsessionid=8AF38874F6E76DDD1BCAEFE654380746.live1?__blob=publicationFile&v=1 - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.

115. В. Л. Клепко, А. В. Александров. Системы координат в геодезии. Урал. гос. горный ун-т. - Екатеринбург: Издательство УГГУ, 2011. - 114 с.: граф.; 21 см. - Библиогр.: с. 113-114. - 200 экз. - ISBN 978-5-8019-0274-6.
116. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Пругло А.В., Равдин С.С. Метод компенсации погрешности наклона оси телескопа в астроизмерителе уклонения нормали к геоиду // *Астрономический журнал*. 2018. Т. 95. № 12. С. 912-914.
117. Levenberg, K. A Method for the Solution of Certain Problems in Last Squares. *Quart. Appl. Math.* 1944. Vol. 2. P. 164—168.
118. Marquardt, Donald (1963). «An Algorithm for Least-Squares Estimation of Non-linear Parameters». *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 11 (2): 431–441.
119. https://fits.gsfc.nasa.gov/fits_documentation.html - электронный ресурс. Проверено 30.09.2019 г.
120. <http://nova.astrometry.net/upload> - электронный ресурс. Проверено 30.09.2018 г.
121. <http://meade.ru/lx200-acf-8-f-10-no-tripod/> - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
122. Исаенко А.В., Рахимов И.А., Тарасов В.А. «Повышение эффективности работы квантово-оптической системы «Сажень-ТМ» в климатических условиях обсерватории «Светлое». *Труды Института прикладной астрономии РАН*, вып. 37, 2016, с. 86-92.
123. Мурзабеков М.М., Пругло А.В, Равдин С.С. Программный комплекс для вычисления уклонения нормали к поверхности геоида по результатам астроизмерений // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018616360.
124. Мурзабеков М.М. Исследование алгоритма астрономо-геодезического метода определения уклонений нормали // *Вестник метролога*. – 2019. - № 3. – С 8-11.
125. ГОСТ Р 8.736-2011 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения.

126. http://aco.ifmo.ru/el_books/numerical_methods/lectures/glaval.html - электронный ресурс. Проверено 16.10.2019 г.
127. Конешов В.Н. Современные глобальные модели гравитационного поля земли и их погрешности / В.Н. Конешов, В.Б. Непоклонов, Р.А. Сермягин, Е.А. Лидовская // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 1 . – С. 107-118.
128. Косарев Н.С., Канушин В.Ф., Кафтан В.И., Ганагина И.Г., Голдобин Д.Н., Г.Н. Ефимов. О результатах сравнения определения уклонения отвесной линии на территории западной Сибири // Гироскопия и навигация. Том 25. – 2017 – №4 – с. 72 – 83.
129. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Равдин С.С., Пругло А.В. Комплекс для оперативного уточнения параметров неоднородности гравитационного поля Земли // В книге: Метрология времени и пространства. Доклады IX Международного симпозиума. Менделеево Московской области, 12-14 сентября 2018 г. – Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ». 2019. С. 100-106.
130. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Гостев Ю.В., Бобров Д.С., Давлатов Р.А., Кузьмин Н.И., Долгодуш А.О. Результаты подготовки навигационно-гравиметрической и навигационно-магнитометрической карт в интересах реализации ассистирующей технологии ГЛОНАСС // В книге: Метрология времени и пространства Материалы IX Международного симпозиума. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2018. С. 200-201.
131. Богдан Яковлевич Швейцер (1816-1873) Исследование местной аттракции, существующей около Москвы: Сообщения первое и второе / Москва, в Университетской типографии, 1862. - [6], 116 с.: 4 л. карт., черт.; 22 x 14 см.
132. http://www.sai.msu.ru/history/town_mencin.html - Электронный ресурс. Проверено 15.11.2019 г.
133. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф. Комплекс средств метрологического обеспечения для астроизмерителей неоднородности гравитационного поля Земли // В сборнике: Метрология времени и пространства Доклады VIII Международного симпозиума. ФГУП «ВНИИФТРИ». 2017. С. 147-153.

Приложение А

Модель измерений нового метода

Модель измерений с новым методом выглядит следующим образом:

$$\begin{pmatrix} n_{incl}^x \\ n_{incl}^y \end{pmatrix}_N = M \times R \times A_N \times \mathbf{n} + k \cdot \Delta T, \quad (\text{A.1})$$

где N – количество измерений (количество стационарных положений телескопа, $N \geq 10$); $\begin{pmatrix} n_{incl}^x \\ n_{incl}^y \end{pmatrix}$ – модельные измерения инклинометра по осям OX и OY ; M – матрица для оценки параметров инклинометра; R – матрица поворота из СК ПЗС-сенсора в СК инклинометра; A – матрица ориентации ПЗС-сенсора в местной СК; \mathbf{n} – нормированный вектора силы тяжести в местной СК; $k = \begin{pmatrix} k_x \\ k_y \end{pmatrix}$ – температурные коэффициенты по осям инклинометра; ΔT – изменение температуры относительно опорного значения.

Матрица A вычисляется на основе данных измерений, а сдвиг температуры ΔT определяется по показаниям датчика температуры, т.е. эти параметры являются известными. Для упрощения итоговой подробной записи модели нового метода, будем предполагать, что все коэффициенты матрицы A и сдвиг температуры равны 1, т.е.

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}, \quad \Delta T = 1.$$

После перемножения всех компонентов уравнения (A.1), получим выражения для n_{incl}^x, n_{incl}^y :

$$\left\{ \begin{aligned}
n_{incl}^x &= (m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi) - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) \\
&+ m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta) \cdot n_x + (m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi) - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi + \\
&m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta) \cdot n_y + (m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \cos \psi + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \\
&\cos \varphi \cdot \sin \psi) - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \cos \theta \cdot \sin \psi + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) + m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta - m_x \cdot \sin \varepsilon \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi) \cdot \sqrt{1 - (n_x)^2 - (n_y)^2} + k_x, \\
n_{incl}^y &= (m_y \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi) + m_y \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) - m_y \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta) \cdot n_x + (m_y \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi) + \\
&m_y \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) - m_y \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta) \cdot n_y + (m_y \cdot (\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \cos \psi + \cos \varphi \cdot \sin \psi) + m_y \cdot (-\sin \varphi \cdot \sin \theta \cdot \sin \psi + \cos \varphi \cdot \cos \psi) - \\
&m_y \cdot \sin \varphi \cdot \cos \theta) \cdot \sqrt{1 - (n_x)^2 - (n_y)^2} + k_y.
\end{aligned} \right.$$

Определение всех 10 неизвестных параметров модели осуществляется путем минимизации среднеквадратического отклонения показаний инклинометра от спроецированных в силу модели прибора, т.е. при минимизации функции:

$$\sum_{i=0}^N \left| \left((n_{incl}^x - inclX_i)^2 + (n_{incl}^y - inclY_i)^2 \right) \right| \rightarrow \min,$$

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