

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



На правах рукописи

Мурзабеков Мурат Муштафарович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЙ УКЛОНЕНИЙ ОТВЕСНОЙ
ЛИНИИ НА ОСНОВЕ ПЕРЕБАЗИРУЕМОГО ЗЕНИТНОГО ТЕЛЕСКОПА

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Менделеево, 2020

Работа выполнена в научно-исследовательском отделении разработки и эксплуатации средств метрологического обеспечения координатно-временных и навигационных систем (НИО-8) ФГУП «ВНИИФТРИ»

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

Официальные оппоненты

Первый оппонент: Плешаков Дмитрий Иванович, доктор технических наук, Главный научный сотрудник 3 управления научно-исследовательского центра топогеодезического и навигационного обеспечения (НИЦ ТГНО) «27 ЦНИИ» Минобороны России.

Второй оппонент: Попадьев Виктор Валерьевич, кандидат технических наук, начальник отдела геодезии Федерального государственного бюджетного учреждения «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных» (ФГБУ «Центр геодезии, картографии и ИПД»)

Ведущая организация - Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В. Ломоносова (ГАИШ МГУ), г. Москва

Защита состоится «30» июня 2020 г. на заседании совета Д308.005.01 в ФГУП «ВНИИФТРИ» по адресу: 141570, р.п. Менделеево, Солнечногорский район, Московская область.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГУП «ВНИИФТРИ».

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



М.В. Балаханов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. 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.

При решении классических геодезических задач значения УОЛ необходимо учитывать при измерении зенитных угловых и линейных расстояний, а также в результаты тригонометрического и геометрического нивелирования на поверхности Земли, а также необходимы 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 ГПЗ 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 астрогеодезический метод, основанный на сравнении геодезических и астрономических координат местоположения в точке измерения с помощью цифрового зенитного телескопа. Это обеспечивает определение УОЛ в режиме реального времени. Приборы, использующие этот метод, называются астроизмерителями УОЛ. В существующем методе 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. Второй недостаток состоит в необходимости обеспечения точности поворота телескопа в горизонтальной плоскости с погрешностью не хуже 10". Вместе с тем, калибровочные коэффициенты изменяются между сериями 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, что усложняет конструкцию астроизмерителя. 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 астроизмерителями.

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 в каждой серии измерений.

Частные научные задачи, поставленные и решённые в работе:

1) Обзор известных методов измерений УОЛ с анализом основных источников погрешностей и метода измерений известными конструкциями 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 измерений УОЛ с помощью разработанного метода 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 изме-

рений 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 построить 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., 2020 г., Москва), на научно-технической конференции «Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение» (2017 г., 2019 г., Менделеево), на научно-технической конференции «Современная астрометрия» (2017 г., 2019 г., Москва, ГАИШ МГУ), в работе научно-деловой программы Международного военно-технического форума «АРМИЯ-2018» (2018 г., 2019 г., 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 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).

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.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, обозначения и сокращения, списка цитируемой литературы из 133 наименований и одного приложения. Общий объем диссертации составляет 154 страницы. Диссертация содержит 47 рисунков и 24 таблицы.

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертации, указаны цели и задачи исследования, сформулированы выносимые на защиту основные положения,

научная новизна, определена практическая значимость и личный вклад автора, приведен краткий анализ метода измерений существующих астроизмерителей.

Глава 1 посвящена обзору состояния и анализу перспектив создания перебазируемых наземных астроизмерителей. Приводится обзор основных методов определения УОЛ и их основных характеристик: точности и оперативности. Анализ сравнения методов определения УОЛ показывает, что на сегодняшний день астрономо-геодезический метод определения УОЛ, который реализуется в астроизмерителях, превосходит остальные методы по точности и оперативности.

Обзор известных зарубежных и российских реализаций астроизмерителей показал, что точность астроизмерителей находится в пределах $0,2''$ - $0,3''$, а точность единичных измерений может достигать до $0,1''$. Время измерений в точке размещения составляет до 1,5 ч. Астроизмерители, разработанные в Швейцарии и Германии, использовались при построении Европейской Объединенной геодезической сети, для уточнения локальной и региональной моделей геоида и гравитационного поля Земли.

Анализ традиционного метода измерений существующих астроизмерителей показал, что она предполагает измерение в двух противоположных положениях телескопа. При этом для его применения необходимо:

- определить калибровочные коэффициенты астроизмерителя перед началом измерений, которые в дальнейшем используются как постоянные величины. Этот процесс может занимать до 30 минут;
- осуществить поворот системы на 180° с погрешностью не хуже $10''$;
- обеспечить жесткость основания размещения астроизмерителя.

Рассмотрены принцип действия и основные математические соотношения астрогеодезического метода определения УОЛ. Проанализированы четыре высокоточных звездных каталога, три метода определения координат центров звезд и четыре метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу алгоритма астрогеодезического метода.

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 этот процесс, составляет около 30 минут.

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

– необходимо обеспечить высокую точность разворота телескопа в горизонтальной плоскости.

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

Глава 2 посвящена рассмотрению основных источников погрешностей при измерениях с астроизмерителем. Анализ показал, что основными из них являются:

- 1) Погрешность определения геодезических координат;
- 2) Погрешность определения времени экспозиции кадра звездного неба;
- 3) Погрешность определения текущего наклона телескопа;
- 4) Астрометрическая погрешность.

Первые три источника погрешности являются «инструментальными». Астрометрическая погрешность включает погрешность определения координат центров звезд, погрешность звездных каталогов, погрешность методов привязки кадров звездного неба к звездному каталогу и искажения в оптической системе телескопа. Проведенный анализ трех методов определения координат центров звезд - метода центра тяжести, метода функции рассеяния точки и метода аппроксимации формы звезд параболоидом - показал, что все они дают погрешности на субпиксельном уровне. Сравнительный анализ четырех звездных каталогов показал, что погрешности координат звезд в каталогах находятся на уровне $0,08''$ и меньше. Рассмотрены два метода для оценки величин искажений в оптической системе телескопа, а также простой в конструкции лазерный коллиматор, который может быть использован для юстировки оптической системы телескопа в лабораторных условиях.

Проведен анализ влияния атмосферной рефракции на результаты измерений. Он показал, что влияние атмосферной рефракции может быть снижено путем формирования средних значений результатов измерений за определенный период времени.

Глава 3 посвящена выводу и описанию нового предложенного метода измерений с астроизмерителем.

Составляющие УОЛ можно найти при известных значениях компонент вектора силы тяжести \mathbf{g} по следующим формулам:

$$\xi = -\arcsin\left(\frac{g_x}{|\mathbf{g}|}\right), \quad \eta = -\arcsin\left(\frac{g_y}{|\mathbf{g}|}\right). \quad (1)$$

Нормируем вектор силы тяжести \mathbf{g} в виде:

$$\frac{\mathbf{g}}{|\mathbf{g}|} = \mathbf{n} \Rightarrow, \quad \mathbf{n} = \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ \sqrt{1-n_x^2-n_y^2} \end{pmatrix}, \quad n_x = \frac{g_x}{|\mathbf{g}|}, \quad n_y = \frac{g_y}{|\mathbf{g}|} \quad (2)$$

С учетом этого, формула (1) примет вид:

$$\xi = -\arcsin(n_x), \quad \eta = -\arcsin(n_y). \quad (3)$$

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

Основными составными элементами астроизмерителя являются телескоп, ПЗС-камера, инклинометр и ГНСС-приемник. Данными измерений с астроизмерителем являются: кадр звездного неба, геодезические координаты, время экспозиции кадра звездного неба, текущий угол наклона телескопа по двум осям ($inclX$, $inclY$) и изменение температуры (ΔT) за время единичной серии.

Определим матрицу ориентации астроизмерителя (ПЗС-сенсора) (обозначим эту матрицу A) в местной (топоцентрической горизонтальной) системе координат (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 света и т.д.) в СК CIRS. 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 декартовы координаты:

$$\begin{pmatrix} ez_x \\ ez_y \\ ez_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \delta \cdot \cos \alpha \\ \cos \delta \cdot \sin \alpha \\ \sin \delta \end{pmatrix}; \quad (4)$$

– 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 находятся 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:

$$\vec{ex} = \vec{el} - \vec{ez} \cdot (\vec{el} \cdot \vec{ez}). \quad (5)$$

Вектор ex нормируется на 1;

– вектор ey вычисляется как векторное произведение:

$$\vec{ey} = [\vec{ez} \times \vec{ex}]. \quad (6)$$

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

$$SENSORtoCIRS = \|\vec{ex} \ \vec{ey} \ \vec{ez}\|. \quad (7)$$

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. Данная матрица вычисляется на основе использования библиотеки SOFA.

3. Вычислим матрицу поворота из СК ITRS в местную СК NWU:

$$ITRStoNWU = \begin{pmatrix} -\sin B \cos L & -\sin B \sin L & \cos B \\ \sin L & -\cos L & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix}, \quad (8)$$

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:

$$A = ITRStoNWU \times CIRStoITRS \times SENSORtoCIRS. \quad (9)$$

При этом неизвестными параметрами астроизмерителя являются:

1) Углы взаимной ориентации φ, θ, ψ осей СК инклинометра и ПЗС-камеры (углы Эйлера). Их можно определить с использованием матриц поворота вокруг осей:

$$R = R_z(\varphi) \cdot R_y(\theta) \cdot R_z(\psi). \quad (10)$$

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

$$M = \begin{pmatrix} m_x \sin \varepsilon & m_x \sin \varepsilon & 0 \\ 0 & m_y & 0 \end{pmatrix}. \quad (11)$$

3) Температурные коэффициенты k_x и k_y осей инклинометра. Они определяются на основе данных об изменении температуры за время измерений.

4) Компоненты n_x, n_y нормированного вектора силы тяжести \mathbf{n} .

Таким образом, неизвестными параметрами астроизмерителя являются 10 параметров:

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

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 стационарных положениях телескопа.

Пример практической реализации нового метода представлен на рис.1. Она заключается в дискретном вращении телескопа в горизонтальной плоскости дважды с наклоном оси телескопа во втором вращении.

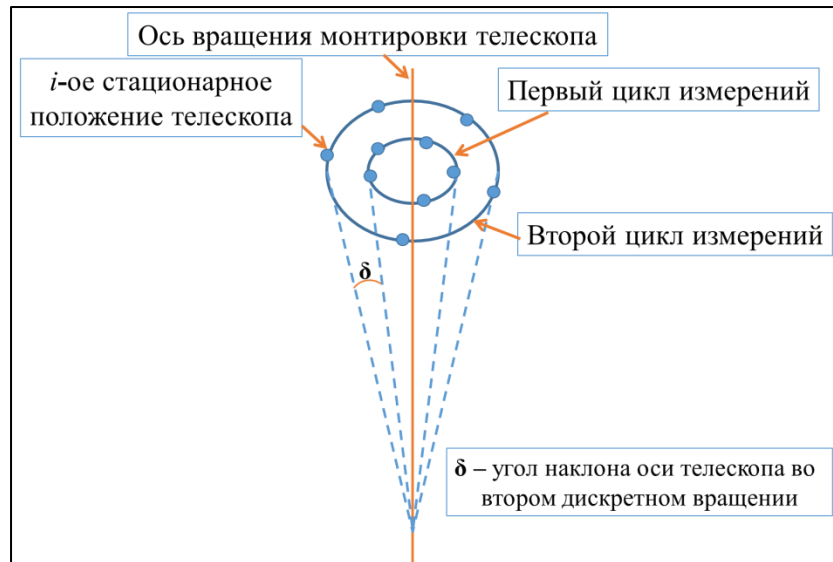


Рис. 1. Пример практической реализации нового метода измерений

Основным требованием достоверности измерений с новым методом является жесткость системы телескоп – ПЗС-камера – инклинометр.

Основными преимуществами предложенного метода являются:

1. В каждой серии измерений происходит одновременное оценивание 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 и производительность 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 измерения на любом твердом основании (грунтовые, асфальтовые дороги и площадки). Это особенно важно при измерениях в полевых условиях.

Глава 4 посвящена моделированию нового метода измерений УОЛ в лабораторных условиях и его испытаниям в полевых условиях.

Разработана программно-математическая модель астроизмерителя и проведено моделирование нового метода в лабораторных условиях. Данные моделирования использовались для отладки и проверки работоспособности алгоритмов нового метода в лабораторных условиях, что позволило внедрить их при непосредственных испытаниях в полевых условиях.

Создан астроизмерительный испытательный стенд для испытания нового метода в полевых условиях на основе макета астроизмерителя.

Испытания разработанного метода с астроизмерительным испытательным стендом проводились на 5 географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях в течение 16 звездных наблюдательных ночей 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».

Описываются условия испытаний и особенности всех географических точек: месторасположение, наличие мешающего уличного освещения и автомобильных дорог, среднее количество наблюдаемых звезд в кадре звездного неба.

Испытания в каждой точке состояли из серии измерений по два цикла. Длительность каждой серии составляет 6 минут.

В процессе испытаний нового метода рассмотрены:

1) *три наиболее употребляемых метода определения координат центров звезд*: метода центра тяжести, метода функции рассеяния точки и метода аппроксимации формы звезды параболоидом на точность итоговых значений УОЛ.

2) *четыре звездных каталога*: Tycho-2, PPMXL, UCAC4 и GAIA DR2.

3) *четыре метода привязки кадра звездного неба к звездному каталогу*: линейный (аффинный) и полином 2-ой, 3-ей и 4-ой.

Выполнена оценка влияния выбора метода обработки на точность значений УОЛ. Установлено, что их суммарное влияние не превышает 0,03", что является несущественной величиной.

В процессе испытаний нового метода обнаружено неконтролируемое изменение калибровочных коэффициентов астроизмерителя, а именно, масштабных коэффициентов инклинометра m_x и m_y в течение измерений в одной точке. Пример значений m_x и m_y для каждой серии и их изменений между сериями представлен на рис. 2.

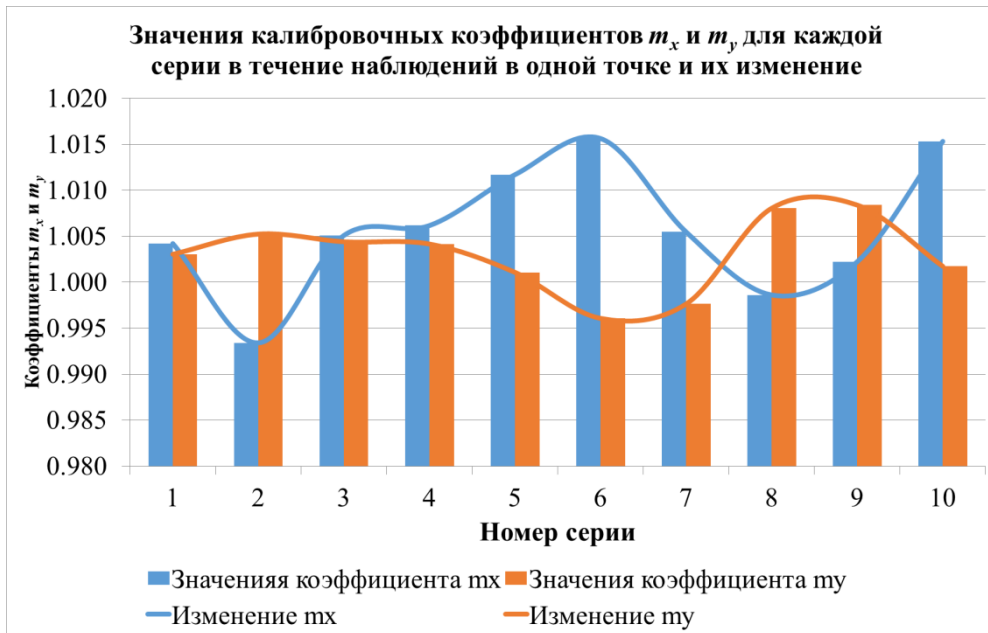


Рис. 2. Значения калибровочных коэффициентов m_x и m_y и их изменение в течение измерений в одной точке

Как видно из рис. 2, наблюдается изменение коэффициентов m_x и m_y в течение измерений в одной точке, изменения происходят случайным образом.

Проведено сравнение значений УОЛ с оценкой калибровочных коэффициентов для каждой серии в соответствии с предложенным методом и без их оценки (m_x и m_y , определенные в первой серии (см. рис. 2), использовались как постоянные значения для остальных серий).

На рис. 3 а) и б) приведены кривые изменения вычисленных значений УОЛ в зависимости от номера серии (кривые 1 и 2) и изменение m_x и m_y (кривые 3 и 4).

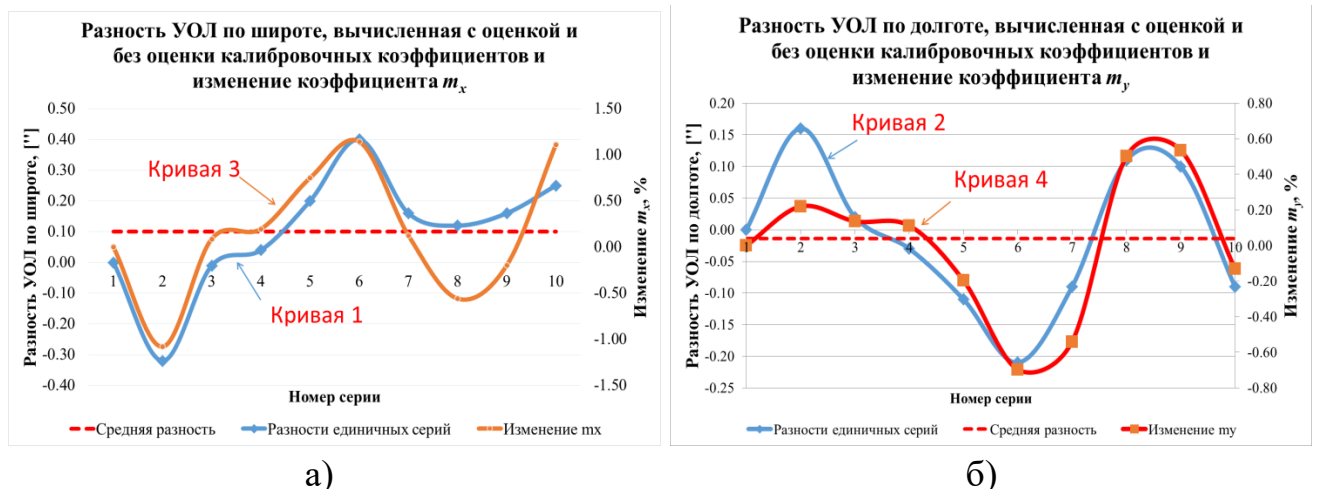


Рис. 3. Разности УОЛ, вычисленные с оценкой калибровочных коэффициентов для каждой серии и без их оценки и изменение коэффициентов для одной наблюдательной точки: а) по широте и m_x ; б) по долготе и m_y

Как видно из рис. 3, наблюдается четкая корреляция между разностью УОЛ и изменением коэффициентов m_x и m_y . При этом разности единичных серий могут

доходить до 0,4", средняя разность УОЛ по широте составляет 0,10", а по долготе - 0,01".

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

Рассмотрим пример испытаний для точки «Боровичи». Она 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. Результаты испытаний для каждой наблюдательной ночи представлены в табл. 2.

Табл. 2. 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 табл. 2, 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 измерений.

Результаты испытаний нового метода представлены на рис. 4.



Рис. 4. СКО определения составляющих УОЛ на пяти точках в течение 16 наблюдательных звездных ночей в 2018 г.

Как видно из рис. 4, среднее значение СКО определения составляющих УОЛ не превышает $0,2''$. СКО некоторых единичных измерений не более $0,1''$.

Таким образом, результаты испытаний показали, что поставленная в диссертационной работе цель 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 не превышает $0,2''$.
- 3) Производительность измерений повышена в два раза – до 5-8 точек за ночь.

Выполнен расчет неисключенной систематической погрешности (НСП) составляющих УОЛ Θ_ξ и Θ_η по формулам:

$$\begin{aligned} \Theta_\xi &= \pm |c_1 \cdot \Theta_B + c_3 \cdot \Theta_\Phi + c_5 \cdot \Theta_{inclX}|, \\ \Theta_\eta &= \pm K \cdot \sqrt{c_2^2 \cdot \Theta_L^2 + c_4^2 \cdot \Theta_\Lambda^2 + c_6^2 \cdot \Theta_{inclY}^2 + c_7^2 \cdot \Theta_{угс}^2}, \end{aligned} \quad (15)$$

где $K = 1,4$ ($P = 0,99$); Θ_i – i -ая составляющая НСП; c_i – коэффициенты чувствительности для каждой составляющей НСП.

Коэффициенты чувствительности рассчитывались численно по методу двусторонней разности. В табл. 3 представлены значения каждой составляющей НСП и коэффициентов чувствительности.

Табл. 3. Значения составляющих НСП и коэффициентов чувствительности

Наименование	Обозначение	Значение	c_i
Погрешность определения геодезической широты	Θ_B	0,01"	1,00
Погрешность определения геодезической долготы	Θ_L	0,01"	$\cos B$
Погрешность определения астрономической широты	Θ_Φ	0,3"	1,00
Погрешность определения астрономической долготы	Θ_Λ	0,3"	$\cos B$
Погрешность определения текущего наклона по оси OX	Θ_{inclX}	0,6"	0,23
Погрешность определения текущего наклона по оси OY	Θ_{inclY}	0,6"	0,23
Погрешность определения времени экспозиции кадра звездного неба	$\Theta_{t_{\text{тс}}}$	0,01"	$\cos B$

В соответствии с (15) и табл. 3, значения НСП для составляющих УОЛ для пункта «Астропавильон» равны: $\Theta_\xi = \pm 0,45''$; $\Theta_\eta = \pm 0,30''$.

В интересах решения задачи создания высокодискретной карты ГПЗ на территории Московской области были выбраны 18 точек с расстоянием 3-5 км друг от друга, на которых были проведены измерения УОЛ с помощью астроизмерительного испытательного стенда.

Для точек полигона были вычислены значения составляющих УОЛ по модели геопотенциала EGM2008 (пространственное разрешение $\approx 18-20$ км). Измеренная и модельная карты УОЛ по долготе представлены на рис. 5.

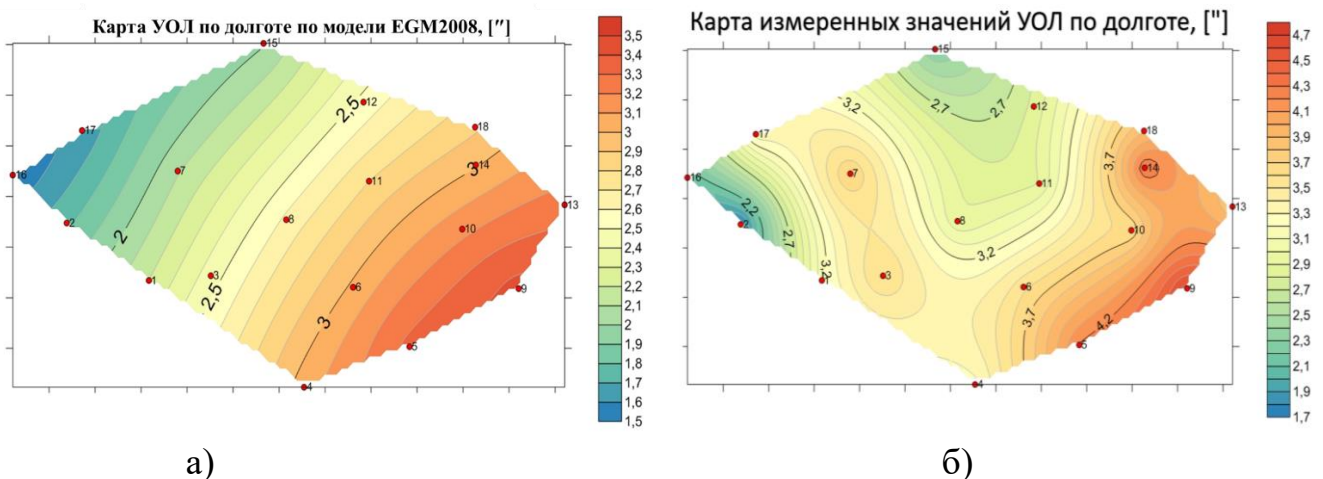


Рис. 5. Карта УОЛ по долготе: а) модельная; б) измеренная

Как видно из рис. 5, на карте, вычисленной по модели, не наблюдаются аномалии, фон равномерный. В то же время, карта измерений показывает в силу высокого разрешения и точности наличие локальных аномалий, т.е. вскрывается тонкая структура ГПЗ.

Новый 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, которая также недостижима с современными моделями геопотенциала.

При подготовке маршрута навигации по ГПЗ, создаваемой в рамках плановой НИР, уточнены значения УОЛ на Московской гравитационной аномалии (аттракция). Наличие аномалии вокруг Москвы впервые было обнаружено в 1850-х гг. профессором астрономии Московского университета Богданом Яковлевичем Швейцерам. Для исследования аттракции был снят профиль УОЛ вдоль аттракции состоящий из 21 точки со средним расстоянием 4,5 км друг от друга. Для точек профиля вычислены значения УОЛ по модели EGM2008. На двух точках профиля аттракции проведены контрольные повторяющиеся измерения. При этом получено, что разность УОЛ не превышает 0,1", что говорит о хорошей повторяемости результатов измерений.

Измеренные и модельные значения УОЛ вдоль профиля показаны на рис. 6.



Рис. 6. Измеренный и модельный профили УОЛ вдоль аттракции

Как видно из рис. 6, профили УОЛ, построенные по модели EGM2008, сглаженные, в то время как измеренные профили показывают сильную изрезанность УОЛ вдоль профиля. 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".

Рассмотрен созданный комплекс средств метрологического обеспечения астроизмерителей. Комплекс включает астрономический павильон, который выполнен в виде блок-контейнера, три железобетонных постаментов, заглубленных на 2 м, для обеспечения устойчивости при измерениях, и необходимые технические условия. Главной составляющей комплекса является макет астроизмерителя, оснащенный новым методом измерений. Комплекс позволит выполнять сличение одновременно до трех астроизмерителей.

В **заключении** приводятся основные научные результаты диссертации.

Основные результаты и выводы:

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

В процессе исследования получены следующие основные результаты:

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

2) Разработана программно-математическая модель (ПММ) астроизмерителя для моделирования нового метода измерений. ПММ использовалась для моделирования практической реализации нового метода измерений УОЛ и проверки работоспособности и отладки алгоритмов его обработки в лабораторных условиях. Это позволило использовать алгоритмы нового метода при непосредственных испытаниях в полевых условиях.

3) Создан астроизмерительный испытательный стенд для испытания нового метода в полевых условиях на основе макета астроизмерителя.

4) Проведена оценка зависимости точности астроизмерителя 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) Проведены испытания нового метода с помощью созданного астроизмерительного испытательного стенда на 5 географических точках в Московской, Калужской и Новгородской областях в течение 16 наблюдательных ночей. Результаты испытаний показали:

– время проведения измерений в точке сокращается с 1,5 ч до 30 минут;

- среднее квадратическое отклонение измерений снижено до 0,2";
- производительность измерений повысилась в два раза – 5-8 точек за ночь.

б) 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.

Публикации по теме диссертации в рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Мурзабеков М.М. Исследование алгоритма астрономо-геодезического метода определения уклонений нормали // Вестник метролога. – 2019. - № 3. – С 8-11.
2. 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.
3. Мурзабеков М.М., [Кобаев А.В.], Фатеев В.Ф. Метрологические характеристики астрогеодезического измерителя уклонений отвесной линии на основе цифрового зенитного телескопа // Геодезия и картография. 2016. № 4. С. 10-17.

Публикации по теме диссертации в журналах, входящих в РИНЦ

4. Murzabekov M.M., Fateev V.F., Pruglo A.V., Ravdin S.S. A method for correcting for tilt errors in a plumb-line deviation astrometer // Astronomy Reports. 2018. Т. 62. № 12. С. 1013-1015.
5. Мурзабеков М.М. Астрономический измеритель уклонений отвесной линии на основе цифрового зенитного малогабаритного телескопа // В книге «Метрология в XXI веке. Материалы VI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов». ФГУП «ВНИИФТРИ». 2019. С. 84-92.
6. 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.
7. 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.

8. 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.
9. Мурзабеков М.М., Денисенко О.В., Сильвестров И.С., Фатеев В.Ф., Бобров Д.С., Давлатов Р.А., Рыбаков Е.А. Система гравиметрических измерений, выполненных ФГУП "ВНИИФТРИ" в интересах повышения точности модели ГПЗ и создания новых измерительных приборов // В сборнике: Навигация по гравитационному полю Земли и ее метрологическое обеспечение. Доклады научно-технической конференции. 2017. С. 277-282.
10. Мурзабеков М.М. Алгоритм определения уклонений отвесной линии астрогеодезическим методом // В сборнике: Метрология в XXI веке Доклады IV научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и специалистов. 2016. С. 211-217.
11. Мурзабеков М.М., Фатеев В.Ф., Гостев Ю.В., Рыбаков Е.А., Бобров Д.С. Решение задач метрологического обеспечения астрономо-геодезических и гравиметрических измерений, применяемых в интересах повышения характеристик системы ГЛОНАСС // Мир измерений. 2016. № 3. С. 18-21.

Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ

1. 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.