РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

УДК 519.2+521+522

МАЛКИН Зиновий Меерович

Решение задач фундаментального координатно-временного обеспечения классическими и спутниковыми методами

Специальность 01.03.01
Астрометрия и небесная механика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

С.-Петербург
1997

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Официальные оппоненты:

академик НАН Украины, доктор физико-математических наук	Я.С.Яцкив
доктор физико-математических наук	Г.А.Красинский
доктор технических наук	Л.С.Юношев

Ведущая организация: Главная астрономическая обсерватория РАН

Защита состоится 26 июня 1997 г. в 15 час. на заседании диссертационного совета Д-200.06.01 при Институте прикладной астрономии РАН (197110, С.-Петербург, Ждановская ул., д. 8) по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзывы на диссертацию и автореферат направлять в адрес диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан 26 мая 1997 г.

Ученый секретарь
доктор физ.-мат. наук А.Т.Байкова

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

По мере развития фундаментальных и прикладных исследований в области астрометрии, геодинамики, геофизики, исследования космоса, а также для многих практических приложений в таких областях как геодезия, космонавтика, изучение природных катастрофических явлений, обороны и др., непрерывно повышаются требования к точности определения земной и небесной систем координат и связи между ними, задаваемой параметрами вращения Земли (ПВЗ), а также синхронизации шкал времени. Сравнительно недавно эта область астрометрии получила название координатно-временное обеспечение (КВО), хотя перечисленные задачи являются основными для астрометрии со времени ее возникновения.

Возросшие практические потребности, с одной стороны, и необходимость более детального изучения многих геофизических и геодинамических явлений, с другой стороны, выдвигают новые требования к точности и оперативности ПВЗ. Международная служба вращения Земли (IERS) ставит задачу довести в течение ближайших пяти лет точность определения ПВЗ до $0.0001''$. Разумеется, здесь имеется в виду точность сводного ряда ПВЗ, получаемого в IERS как результат сводной обработки индивидуальных рядов, вычисляемых в различных обрабатывающих центрах. С другой стороны, решение многих современных проблем наук о Земле невозможно без повышения точности определения координат станций и положения геоцентра на миллиметровом уровне точности. Для решения этих задач необходимо, в первую очередь, добиваться повышения точности самих индивидуальных рядов ПВЗ и координат станций, получаемых на основе обработки данных наблюдений различными методами.

В течение многих десятилетий основными и наиболее точными инструментами для определения ПВЗ и координат станций были классические инструменты служб времени и широты. Эти же инструменты вносили заметный вклад в создание звездных каталогов, т.е. небесной системы координат. Реальная предельная точность этих инструментов лежит в пределах $0.05 - 0.1''$ и даже такой невысокой, по современным понятиям, точности приходилось добиваться индивидуально на каждом инструменте, непрерывно совершенствуя методику исследования инструмента, наблюдений и их обработки. Поэтому работы, направленные на повышение точности результатов наблюдений времени и широты, всегда были актуальны для науки и практики.

Точность определения параметров вращения Земли и координат станций классическими методами не позволяет решать многие задачи фундаментальной науки и практики с необходимой точностью. К таким задачам относятся изучение целого класса явлений, связанных с динамикой Земли, взаимодействием жидкого и твердого ядра, ядра и мантии, мантии и атмосферы, движение тектонических плит и геоцентра, изучение локальных деформаций земной коры, вызывающих, в частности, природные катастрофические явления, высокоточная наземная и космическая навигация, баллистическое обеспечение геодезических и навигационных ИСЗ и др. Поэтому в течение последних 10–15 лет развились принципиально новые методы получения координатно-временной информации с точностью, превышающей на два-три порядка точность классической астрометрии, т.е. на уровне $0.0001-0.0003''$. В настоящее время основные данные о ПВЗ и земной системе координат дают три метода наблюдений: радиоинтерферометрия со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерная локация ИСЗ (SLR) и глобальная навигационная система GPS, имеющие примерно одинаковую точность.

РСДБ наблюдения позволяют независимо определять все типы ПВЗ: координаты полюса, всемирное время UT1 и поправки к углам нутации. Они же позволяют поддерживать наиболее точную на сегодняшний день небесную систему координат, опирающуюся на координаты внегалактических радиоисточников. Наконец, это один из основных методов изучения глобальных деформаций земной коры. Поэтому метод РСДБ является базовым для системы КВО. В то же время его применение ограничено в силу сложности и дороговизны наблюдений и принципиальной невозможности привязки координатных определений к геоцентру.

Спутниковые методы эффективны, в основном, для определения координат полюса и длительности суток, а также позволяют определять всемирное время на ограниченных интервалах времени (на длительных интервалах необходимо использование данных РСДБ для периодической калибровки). Кроме того, они обеспечивают наиболее оперативное определение координат полюса и, с некоторыми ограничениями, UT1. Эти наблюдения также являются самым точным средством определения геоцентрических координат станций и положения геоцентра (хотя при изучении их изменений большой вклад вносят также и РСДБ наблюдения).

Применение ИСЗ является в настоящее время одним из основных средств решения многих задач геодезии, геофизики и геодинамики. Для этой цели применяются две группы ИСЗ – геодезические, имеющие устойчивые орбиты, специально разработанную конструкцию для минимизации внешних воздействий на эволюцию орбиты и снабженные уголковыми отражателями для высокоточных светодальномерных измерений, и навигационные, обеспечивающие высокоплотные радиотехнические измерения. Хотя у каждого из этих методов имеются свои достоинства и недостатки, их применение позволяет решать задачи определения координат, движений земной коры и определения параметров вращения Земли, обеспечивая высокую временную и пространственную плотность результатов, недоступную РСДБ. Таким образом, работы, направленные на освоение и использование методов, связанных с наблюдениями ИСЗ, для решения задач КВО безусловно актуальны.

Цели работы

Основными целями настоящей работы являются:

1. Исследование методов определения ПВЗ и координат станций и поиск путей повышения их точности.
2. Анализ методов обработки наблюдений с целью изучения и, по-возможности, уменьшения методических ошибок.
3. Получение высокоточных значений ПВЗ и координат станций.
4. Разработка принципов построения и создание службы определения ПВЗ.
5. Создание и исследование локальных геодезических сетей РСДБ комплекса КВАЗАР.

По мере выполнения работы были поставлены и решены следующие конкретные задачи:

1. Построение новой теории инструментальных ошибок фотографической зенитной трубы (ФЗТ).
2. Определение всемирного времени, долготы места и вывод каталога звезд международной программы наблюдений на ФЗТ в Китабе.
3. Определение параметров нутации Земли по наблюдениям на ЗТ.

4. Разработка оптимальной методики высокоточного вычисления ПВЗ из SLR наблюдений.
5. Разработка методов оперативного определения ПВЗ из SLR наблюдений с задержкой порядка 2 суток без потери точности и создание структуры службы определения ПВЗ (обмен данными, прогнозирование, вычисление суточных рядов ПВЗ, автоматизация оперативных вычислений и т.д.).
6. Определение координат российских станций в глобальной координатной системе по результатам GPS наблюдений кампании BSL'93.
7. Создание и исследование локальных геодезических сетей наблюдательных пунктов (НП) РСДБ комплекса КВАЗАР;
8. Создание программной системы для высокоточного анализа SLR наблюдений, рядов ПВЗ и геодезических измерений.

Научная новизна работы

1. Разработана новая теория инструментальных ошибок ФЗТ, основные выводы которой приложимы также для фотоэлектрической зенитной трубы (ФЭЗТ), построенной по классической оптической схеме. Предложены новые методы исследования и учета инструментальных ошибок ФЗТ.
2. Получен каталог звезд международной программы ФЗТ модифицированным МНК; уточнена долгота Китаба.
3. Получены точные универсальные формулы обработки наблюдений шкальных пар на зенит-телескопах. Предложена методика определения цены оборота по наблюдениям шкальных пар и/или рядов по нескольким периодам наблюдений с возможным изменением цены оборота винта микрометра между ними.
4. Определены главные коэффициенты нутации Земли по наблюдениям с ЗТФ-135 в Пулкове.
5. Проведен анализ наблюдений ярких зенитных звезд в Полтаве с целью обнаружения свободной нутации Земли с близсуточным периодом; показано, что предыдущие выводы об обнаружении нутационного колебания в исследуемой полосе частот недостаточно обоснованы.
6. Предложена методика точного учета потемнения солнечного диска к краю при вычислении орбиты ИСЗ в полутени Земли.

7. Проведено исследование методики определения ПВЗ из SLR наблюдений, включающее изучение влияния на окончательный результат отдельных элементов модели редукции, координат станций, состава определяемых параметров и т.д. Выработанная в результате этого исследования стратегия определения ПВЗ применена для вычисления рядов ПВЗ за 1988–1996 гг., точность которых находится на уровне лучших мировых центров обработки SLR наблюдений.
8. Разработан метод оперативного определения ПВЗ из SLR наблюдений, позволяющий определять координаты полюса и, с некоторыми ограничениями, всемирное время с точностью и оперативностью, лучшими, чем в других центрах обработки SLR наблюдений.
9. Разработана методика тестирования методов прогноза ПВЗ. С ее использованием исследованы два метода прогноза ПВЗ, применяющиеся в IERS, и предложен комбинированный метод прогноза координат полюса и всемирного времени, используемый в службе определения ПВЗ ИПА РАН. Предложено уточнение стандартной модели нутации IERS, включенное в новую версию стандарта.
10. Получено новое сводное решение BSL'93, имеющее существенно более высокую точность, чем существующее. Впервые определены координаты пяти российских станций в глобальной координатной системе ITRF на сантиметровом уровне точности.
11. Проведен сравнительный анализ алгоритмов сглаживания временных рядов методом Уиттекера и предложена его обобщенная формулировка. Показано, что алгоритм Юсупова имеет определенные преимущества перед алгоритмом Вондрака, связанные с независимостью степени сглаживания от размерности аргумента и бóльшей устойчивостью при сглаживании существенно неравномерных по времени рядов. Рассмотрены возможности увеличения крутизны передаточной функции метода Уиттекера и использования его в качестве полосового фильтра.
12. Предложены простые и эффективные формулы для аппроксимации нормального распределения, распределений Стьюдента и $\zeta(Q,n)$, которые позволяют значительно упростить вычисление квантилей этих распределений при сохранении достаточной для практических нужд точности.

Научная и практическая значимость работы

1. Разработанная теория инструментальных ошибок зенитной трубы послужила основой для уточнения методики исследования ошибок ФЗТ в Китабе и использована при разработке проекта ФЭЗТ. Предложенные методы исследования и учета инструментальных ошибок применены при обработке наблюдений на ФЗТ в Китабе. Предложенный метод уравнивания наблюдений применен при выводе рабочих каталогов звезд на ФЗТ в Китабе и ЗТФ-135. Новый каталог прямых восхождений звезд международной программы ФЗТ позволил значительно повысить точность определения всемирного времени. Уточненная методика определения цены оборота использована для определения цены оборота ЗТ Бамберга и ЗТФ-135.

2. Разработанная методика определения ПВЗ из SLR наблюдений в течение двух лет применяется в работе службы определения ПВЗ ИПА РАН, составляя в настоящее время ее основу и обеспечивая точность глобальных решений на уровне лучших мировых центров обработки SLR наблюдений и вычисление срочных данных с превосходящей другие центры точностью и оперативностью. Создана структура службы определения ПВЗ, решающая вопросы обмена данными, автоматизации оперативных вычислений, получение суточных рядов ПВЗ, прогноз и др. Работа службы в течение двух лет показала высокую степень надежности применяемых алгоритмических и программных решений. Результаты, получаемые службой ПВЗ ИПА РАН, впервые в отечественной практике используются в IERS при получении сводных оперативных и глобальных решений. Уточненная модель нутации использована в новой версии стандарта IERS Conventions.

3. Полученные в результате сводной обработки GPS наблюдений кампании BSL'93 координаты уровнемерных станций позволяют произвести их более точную взаимную привязку и повысить, таким образом, точность определения уровня и топографии Балтийского моря. Впервые определенные высокоточные координаты пяти российских станций в международной глобальной системе ITRF позволяют значительно повысить точность взаимной привязки отечественной и зарубежных геодезических систем.

4. Разработаны принципы построения и исследования локальных геодезических сетей (ЛГС) РСДБ комплекса КВАЗАР. Построены первые

очереди ЛГС НП Светлое и Зеленчукская. GPS измерения на ЛГС НП Светлое в 1994–1996 гг. совместно с нивелирными и светодальномерными измерениями показали, что реальная точность определения взаимного положения марок составляет 2–3 мм, что соответствует точности локальных сетей основных станций глобальной системы ITRF.

На защиту выносятся

1. Новая теория ФЗТ и методы исследования инструментальных ошибок ФЗТ и ЗТ, позволяющие повысить точность их учета, и результаты наблюдений на этих инструментах.
2. Методика определения ПВЗ из SLR наблюдений, позволяющая значительно повысить точность вычисления координат полюса и скорости вращения Земли, и результаты ее применения для обработки наблюдений за 1988–1997 гг..
3. Принципы построения, алгоритмы вычислений и результаты работы службы определения ПВЗ, позволяющие получать независимые оперативные и окончательные данные о ПВЗ.
4. Результаты исследования региональных и глобальных геодезических сетей по GPS наблюдениям.
5. Программная система GROSS для анализа SLR наблюдений и геодезических измерений на миллиметровом уровне точности.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, представлялись на пленуме комиссии по изучению вращения Земли Астрономического совета АН СССР, Полтава, 1972 г.; всесоюзном совещании "Вращение Земли и геодинамика", Китаб, 1981 г.; выездном заседании проблемно-тематической группы "Вращение Земли" секции астрометрии Астрономического совета АН СССР, Благовещенск, 1984 г.; II Орловской конференции, Полтава, 1988 г.; VII международном Лорманновском коллоквиуме, Дрезден, 1988 г.; симпозиуме 141 МАС "Inertial Coordinate System on the Sky", С.-Петебург, 1990 г.; конференции с международным участием "Теоретическая, прикладная и вычислительная небесная механика", С.-Петербург, 1993 г.; девятом Европейском совещании по применению РСДБ в геодезии и астрометрии, Бад Нойенар, 1993 г.; российской астрометрической конференции, С.-Петербург, 1993 г.; шестой Генеральной ассамблее WEGENER, С.-Петербург, 1994 г.; международной конференции "Современные проблемы теоретической астрономии", С.-Петербург, 1994 г.; пятом российском симпозиуме "Метрология времени и пространства", Москва, 1994 г.; XXVI радиоастрономической конференции, С.-Петербург, 1995 г.; совещании подкомиссии IAG SSC 8.1 "Studies of Baltic Sea", Рига, 1996 г.; конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", С.-Петербург, 1996 г.; совещании по APT и APSG, Кашима, 1996 г.; семинарах ГАО РАН, ИПА РАН, Финского геодезического института.

Публикации и вклад автора

Материалы диссертации опубликованы в 53 работах, из которых 20 написаны совместно с другими авторами. В совместных работах автору принадлежат: [1] – обработка наблюдений, участие в дискуссии результатов; [3] – разработка методики и обработка результатов исследования механических контактов, участие в изготовлении и исследовании системы фотоэлектрической регистрации; [5] – участие в наладке и модернизации аппаратуры и уточненная методика обработки сличений средних и звездных часов; [9] – участие в организации и обработка результатов исследования температурного поля павильона ФЗТ$_2$, изучение зависимости результатов определения всемирного времени от конфигурации крыши павильона; [10] – постановка задачи, уравнивание наблюдений МНК; [17] – участие в анализе точности определения цены оборота разными методами, вывод формул обработки наблюдений шкальных пар, разработка методики совместной обработки наблюдений шкальных рядов, сделанных в разные наблюдательные сезоны, участие в обработке наблюдений и дискуссии результатов; [18, 20] – уточнение пулковской методики определения главных коэффициентов нутации, участие в переработке мгновенных широт, вычисление коэффициентов нутации; [19] – участие в проектировании ФЭЗТ, разработка теоретического обоснования и технических предложений на ряд узлов инструмента; [33, 53] – постановка задачи, участие в обработке и дискуссии результатов; [34,38] – постановка задачи, участие в наблюдениях и обработке результатов отдельных наблюдательных сессий, сводная обработка данных; [37,43,46] – постановка задачи, методика исследования точности прогноза, методика прогноза нутации, участие в разработке алгоритмов и программ, интеграция методов прогноза в общее программное обеспечение службы ПВЗ ИПА РАН; [47] – постановка задачи, организация работы по геодезическому обеспечению НП; [49] – участие в наблюдениях и их обработке; [50] – разработка пакета GROSS для обработки SLR наблюдений; [52] – постановка задачи, общая организация работы службы ПВЗ, организация обработки SLR наблюдений, участие в организации обработки РСДБ наблюдений и обмена данными.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, трех частей (9 глав) и заключения. В первой части, включающей три главы, приведены результаты теоретических и методических исследований некоторых классических астрометрических инструментов служб времени и широты и результаты обработки наблюдений на них. Во второй части, состоящей из четырех глав, изложены теоретические, методические и практические результаты применения спутниковых методов для определения ПВЗ и координат станций. В третьей части, включающей две главы, собраны результаты, касающиеся алгоритмов и программ обработки наблюдательных данных.

Общий объем диссертации 245 страниц. Диссертация содержит 49 таблиц, 30 рисунков и список литературы из 230 названий (20 страниц).

Содержание диссертации

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели работы, указаны научная новизна, научная и практическая значимость результатов работы, перечислены результаты, выносимые на защиту, приведены структура и содержание диссертации, указаны печатные работы, в которых отражены основные результаты и определена доля участия автора в совместных публикациях.

В **первой главе** приведены результаты анализа и ревизии теории инструментальных ошибок ФЗТ. Исследование ФЗТ$_2$ в Китабе и участие автора в разработке проекта ФЭЗТ в ГАО РАН выявили многие проблемы, вплоть до ошибок, в существовавшей теории ФЗТ и привели к необходимости ее ревизии. При разработке технического задания на проектирование ФЭЗТ возникла необходимость уточнения узких мест в конструкции типовой зенитной трубы, чтобы обратить на них особое внимание при проектировании ФЭЗТ.

Разработанная теория охватывает все известные, а также некоторые рассмотренные впервые, инструментальные ошибки ФЗТ, большинство из которых влияет на результаты наблюдений на ФЭЗТ, построенной по стандартной оптической схеме. Получены точные формулы влияния на результаты наблюдений неточности перекладки ротора, наклонов фотопластинки и оси вращения ротора, ошибок движения каретки. При этом, в частности, выявились серьезные ошибки существовавшей теории на результаты определения всемирного времени. Приведена методика и результаты вычислений поправки за кривизну параллели в зависимости от различных факторов. Рассмотрено влияние рефракции вне и внутри инструмента. Исследованы различные причины изменения масштаба фотопластинки. Предложены новые методы определения и учета масштаба и ориентации пластинки.

Анализ строгих формул влияния инструментальных ошибок на результаты наблюдений показал, что большинство из них компенсируется для северных и южных звезд и/или при чередовании порядка наблюдений EWEW и WEWE и, следовательно, при их достаточном постоянстве, практически не влияют на окончательные результаты определения широты и всемирного времени по вечеру при рациональной программе и методике наблюдений. Не компенсируются рефракционные ошибки выше объектива, азимут движения каретки, ошибки учета кривизны параллели. Для уменьшения влияния первых из них предложена конструкция павильона для зенитной трубы, свободного, в значительной степени, от рефракционных ошибок.

Во **второй главе** приведены результаты исследования некоторых систематических ошибок наблюдений на ФЗТ$_2$ и результаты определения всемирного времени и долготы Китаба.

Для вывода каталога прямых восхождений звезд международной программы ФЗТ применен модифицированный метод наименьших квадратов, предложенный в настоящей работе. Сравнение τ-члена, вычисленного с новым каталогом прямых восхождений и с каталогом, использовавшимся до него, показало, что амплитуда годовой и полугодовой составляющих уменьшилась на 15% и 32% соответственно. Систематические разности между полученным каталогом и сводным каталогом звезд программ ФЗТ NPZT$_{74}$ могут быть представлены в виде (в мс)

$$\alpha(\text{ФЗТ}_2) - \alpha(NPZT_{74}) = -7 - 2\sin\alpha + 4\cos\alpha + 1\sin 2\alpha + 0\cos 2\alpha\,. \quad (1)$$

Изучение температурного поля внутри павильона ФЗТ$_2$ показало наличие устойчивых температурных градиентов. Определено влияние конфигурации крыши павильона на результаты наблюдений. Оказалось, что каталог прямых восхождений и форма τ-члена мало зависят от положения крыши, в то время как постоянные составляющие τ-членов, определенные по наблюдениям с полностью открытой и приоткрытой крышей, различаются в среднем за исследованный период на 12 мс.

Исследованы системы регистрации времени ФЗТ$_2$. По результатам исследований произведена замена механического контакта каретки на фотоэлектрический и улучшена система регистрации моментов срабатывания контакта винта, после чего обе системы регистрации времени показали высокую точность в случайном и систематическом отношении.

Определен мертвый ход винта каретки по сопоставлению моментов, зарегистрированных контактами винта и каретки и путем прямых измерений механизма винта. Различие величин мертвого хода, полученными двумя методами оказалось равным 0.6 мс. Выявлена зависимость мертвого хода от рабочего участка винта.

Исследованы возможные систематические ошибки приема сигналов времени. Показано, что их сезонное изменение не превышает 0.2 мс.

Исследованы результаты определения всемирного времени на ФЗТ$_2$ в Китабе за период 1976.3–1984.0 гг. Показано, что после модернизации инструмента и аппаратуры ФЗТ, улучшения каталога прямых восхождений и принятия другим мер значительно повысилась точность наблюдений. Случайная ошибка определения всемирного времени по одной звезде уменьшилась с 22.6 до 18.3 мс, случайная ошибка вечера – с 16.8 до 11.5 мс, амплитуда переменной части τ-члена – с 9.0 до 6.0 мс.

На основе изучения различных систематических ошибок наблюдений, влияющих на результат определения долготы, и постоянной составляющей τ-члена определена поправка к долготе Китаба, которая оказалась равной $+21.0 \pm 3.4$ мс.

В **третьей главе** представлены некоторые результаты, касающиеся наблюдений на зенит-телескопах.

Определены главные коэффициенты нутации по наблюдениям с ЗТФ-135 за период 1948.7–1989.0. После сравнительного анализа нескольких методов их определения и выбора оптимальной методики получены поправки к главным коэффициентам нутации в долготе и наклоне, которые приведены в табл. 1 вместе с другими результатами последних определений главных членов нутации по классическим (оптическим) наблюдений и значения, полученные из РСДБ наблюдений и рекомендуемые IERS Conventions (1996). Все значения приведены к эпохе J2000 и выражены в единицах $0.0001''$.

Таблица 1. Результаты определения главных членов нутации.

Метод	M	N	Автор, год
Оптика	68445 ± 22	92101 ± 18	Н.Каптейн, 1988
	68432 ± 08	92058 ± 11	Н.Каптейн, 1988
	68495 ± 26	92006 ± 17	В.В.Лапаева, 1988
	68494 ± 10	92044 ± 10	Я.С.Яцкив, 1991
	68536 ± 8	92062 ± 8	Я.Вондрак, 1993
	68467 ± 33	92031 ± 25	Настоящая работа
Среднее простое	68478 ± 7	92050 ± 6	
Среднее взвешенное	68484 ± 5	92053 ± 5	
РСДБ	68443	92054	

Данные таблицы показывают, что полученные в настоящей работе результаты близки к средним значениям по классическим определениям, которые, в свою очередь, близки к современным результатам, полученным по РСДБ наблюдениям.

Проведен анализ наблюдений двух ярких зенитных звезд в Полтаве за период с июня 1939 г. по август 1965 г. с целью обнаружения свободной нутации Земли с близсуточным периодом. Показано, что задача не имеет определенного однозначного решения по двум причинам.

Во-первых, в изучаемой полосе частот найдено несколько близких по амплитуде (от $0.014''$ до $0.022''$) периодических колебаний широты с периодами $23^h56^m22^s$, $23^h56^m41^s$, $23^h56^m52.5^s$, $23^h57^m06.5^s$, $23^h57^m25.5^s$. Кроме амплитудного проведены фазовый и спектральный анализы. В результате не найдено оснований отождествлять какое-либо одно из обнаруженных колебаний со свободной нутацией Земли.

Во-вторых, автором совместно с В.С.Губановым, показано, что задача определения периода близсуточной нутации по наблюдениям в постоянные моменты среднего или звездного времени не имеет однозначного решения, что следует из теории спектрального оценивания импульсно модулированных сигналов, и является, таким образом, некорректно поставленной.

Получены точные и универсальные формулы обработки наблюдений шкальных пар на ЗТ. Предложен метод определения цены оборота винта по наблюдениям шкальных пар и/или рядов, позволяющий объединять наблюдения, сделанные в различные периоды времени с различным положением микрометра в инструменте и, таким образом, повысить точность определения цены оборота и ее температурного хода. Полученные результаты применены для определения цены оборота винта ЗТ Бамберга и ЗТФ-135.

В **четвертой главе** описаны исследования методики обработки SLR наблюдений и выбранная на их основе оптимальная стратегия вычисления ПВЗ, а также ряды ПВЗ за 1988–1996 г., полученные на основе этой методики; метод оперативных вычислений ПВЗ, применяемый в службе ПВЗ ИПА РАН; случайные и систематические ошибки результатов.

Проведено исследование интегратора VASOMI, разработанного в ГАО НАНУ для интегрирования орбит ИСЗ. Определены оптимальные параметры его настройки для интегрирования орбит ИСЗ типа Lageos с необходимой точностью.

Проведено исследование методов учета ПВЗ при интегрировании орбит ИСЗ. Показано, что метод интерполяции ПВЗ и учет приливных вариаций всемирного времени мало влияют на результат, в то время как ошибки модели нутации оказывают на него сильное влияние.

Предложена методика точного учета потемнения солнечного диска к краю при вычислении орбиты ИСЗ в полутени Земли.

Проведено исследование методики определения ПВЗ из SLR наблюдений, включающее изучение влияния на окончательный результат отдельных элементов модели редукции, координат станций, состава определяемых параметров, длины орбитальной дуги и поддуги и т.д. Выработанная в результате этого исследования стратегия определения ПВЗ применена для вычисления рядов ПВЗ за 1988–1996 гг. Эти ряды представлены в годовой отчет IERS и использованы, наряду с другими двумя лучшими рядами ПВЗ, полученными из SLR наблюдений (из 11 представленных в IERS), при выводе сводного решения.

Разработан метод оперативного определения ПВЗ из SLR наблюдений, позволяющий определять координаты полюса и, с некоторыми ограничениями, всемирное время с точностью и оперативностью, лучшими, чем в других центрах обработки SLR наблюдений. В основе этого метода лежат итеративное улучшение априорных значений ПВЗ, что позволяет получать значения координат полюса и длительности суток, независимые от их априорных значений.

Таблица 2. Точность глобальных решений.

Решение	XY $0.001''$	UT1 0.0001^s	D 0.0001 с
Ряды ПВЗ, вошедшие в сводное решение IERS			
EOP(CSR)96L01	0.24	0.36	
EOP(GSFC)96L01	0.64		0.32
EOP(IAA)96L01	**0.38**		**0.49**
Ряды ПВЗ, не вошедшие в сводное решение IERS			
EOP(CGS)96L01	0.58	1.86	
EOP(CLG)96L01	2.25		0.98
EOP(CLG)96L02	2.52		1.06
EOP(GAOUA)96L01	1.18	1.74	
EOP(GSFC)96L02	0.58		0.71
EOP(GZ)96L02	0.42		
EOP(IAA)96L02	**0.33**		**0.25**
EOP(IARAS)96L01	0.28	0.26	
EOP(IFAG)96L01	0.30	0.08	
EOP(IAA)96L03	**0.24**		

Для сравнения точности определения ПВЗ в ИПА РАН и других центрах обработки SLR наблюдений приведем данные последнего годового отчета IERS за 1995 г. (табл. 2). В первой части таблицы приведены данные для трех наиболее точных и стабильных рядов, отобранных IERS для включения в сводное решение; во второй части – ряды не включенные в сводное решение, для которых в годовом отчете производилось только сравнение с решением IERS. В таблице представлены два ряда ИПА РАН, представленные в годовой отчет IERS. Ряд EOP(IAA)96L01 вычислен по наблюдениям только Lageos на интервале 1988–1995 гг., EOP(IAA)96L02 – по наблюдениям Lageos и Lageos-2 на интервале 1993–1995 гг.. Причина, по которой в сводное решение принят первый из этих рядов, заключается, по-видимому, в его длительности. В последней строке таблицы приведена точность последнего ряда ИПА РАН, вычисленного в конце 1996 г. и предварительно оцененного в IERS (Д.МакКарти, Д.Гамби – личные сообщения).

Для оценки результатов оперативных вычислений произведено сравнение данных, публикуемых в IERS Bulletin A за период с марта 1996 г. по апрель 1997 г. (с марта 1996 г. оперативные данные ИПА РАН вычисляются в новой системе). Такое сравнение произведено без (σ_1) и с учетом (σ_2) весов. Результаты представлены в табл. 3. В последней колонке приведены оценки, сделанные в USNO (Д.МакКарти – личное сообщение), а в последней строке – сводные данные GPS, вычисляемые в USNO.

Таблица 3. Точность оперативных решений.

Центр	σ_1 mas	σ_2 mas	Оперативность дни	σ_{USNO} mas
CSR	0.74	0.32	2–5	0.50
DUT	0.48	0.43	5–10	0.42
ИПА	**0.44**	**0.38**	**2**	**0.35**
GPS	0.40	0.37	2	—

Сравнение точности наших результатов с результатами других центров анализа спутниковых наблюдений показало, что точность рядов ПВЗ, представляемых в годовой отчет IERS, находится на уровне лучших мировых центров обработки, а точность и оперативность результатов срочной службы ПВЗ превосходит результаты других центров обработки SLR наблюдений и находится на уровне сводных рядов GPS, вычисляемых в USNO.

По материалам обработки наблюдений за 1988–1996 гг. изучались статистические характеристики остаточных уклонений. Наиболее интересным результатом этого исследования оказалось обнаружение аномально большого эксцесса распределения остаточных уклонений, который в среднем по всему периоду наблюдений составляет от 1 до 7 в зависимости от алгоритма взвешивания наблюдений. Очевидно, при обработке таких наблюдений следует применять методы оценивания, устойчивые к отклонениям распределения ошибок от нормального.

В **пятой главе** описаны существующая и создаваемая в настоящее время структура службы определения ПВЗ ИПА РАН и результаты ее работы за первые два года.

Создана структура службы определения ПВЗ ИПА РАН, решающая вопросы обмена данными, автоматизации оперативных вычислений, получение суточных рядов ПВЗ, прогноз и др. Определение ПВЗ в ИПА РАН производится в настоящее время двумя методами: из SLR и РСДБ наблюдений. Обработка SLR производится с пакетом GROSS, разработанным автором, с применением методов, полученных в настоящей работе. Оперативное вычисление ПВЗ производится каждый рабочий день в автоматическом режиме. Результаты с марта 1995 г. посылаются в IERS, где используются для вывода сводного оперативного решения. Ежемесячно данные перевычисляются и также отсылаются в IERS. Раз в год вычисляются окончательные ряды ПВЗ за несколько лет, которые представляются в годовой отчет IERS и используются для научного анализа. Работа службы в течение двух лет показала высокую степень надежности применяемых алгоритмических и программных решений.

Обработка РСДБ наблюдений с февраля по ноябрь 1996 г. велась с пакетом ВОРИН, разработанным Л.Ю.Петровым, а с 1997 г. – с пакетом OCCAM, разработанным Н.Зарао и модернизированным О.А.Титовым. В настоящее время им получен трехлетний ряд ПВЗ, показавший достаточную для работы службы точность пакета, и ведется организация оперативных вычислений.

После начала регулярных оперативных определений ПВЗ из РСДБ наблюдений предполагается производить совместную обработку ПВЗ, получаемых из SLR и РСДБ наблюдений. При этом, как показали тестовые эксперименты, можно ожидать повышения точности результатов, получаемых обоими методами, за счет того, что SLR наблюдения позволяют получать более точные оперативные данные о движении полюса, которые могут быть использованы для повышения точности оперативных определений всемерного времени из РСДБ наблюдений. В свою очередь, более точные оперативные значения всемирного времени, получаемые из РСДБ наблюдений, должны обеспечить более высокую точность результатов обработки SLR данных. Наконец, после организации определения ПВЗ из GPS наблюдений, которая ведется в настоящее время, предполагается вычисление сводных рядов ПВЗ на основе объединения результатов, полученных всеми тремя методами.

Для различных практических приложений необходимо иметь прогноз ПВЗ на достаточно длительный период времени. Поэтому при организации службы ПВЗ ИПА РАН было проведено исследование по выбору метода прогнозирования. На первом этапе исследовались два метода, применяющиеся в IERS для прогноза координат полюса и всемирного времени – АРСС и экстраполяция детерминированной составляющей.

Для тестирования разработана специальная методика методов прогноза ПВЗ по трем параметрам: среднеквадратическое отклонение прогнозированных от наблюденных ПВЗ, максимальное (по модулю) отклонение прогнозированных от наблюденных ПВЗ, влияние возможных ошибок в последних наблюдениях ПВЗ на результат прогноза (что важно для практической службы ПВЗ, когда точность последних оперативных определений обычно ниже, чем более старых данных).

С использованием предложенной методики исследованы указанные выше два метода прогноза и предложен комбинированный метод, используемый в службе определения ПВЗ ИПА РАН. Суть комбинированного прогноза заключается в использовании разных методов для разных сроков прогноза. Точность комбинированного прогноза ненамного выше, чем точность прогноза IERS, но он имеет то преимущество, что он обеспечивает плавный, без излома, переход между наблюденными и прогнозированными значениями.

Для прогноза углов нутации мы используем рекомендованную IERS Conventions (1996) модель Т.Херринга, реализованную в его программе `KSV_1996_3`. Для ее тестирования сравнивались разности между моделью Херринга и теорией нутации IAU80 со значениями EOP(IERS)C04. Сравнение показало, что разность между моделью Херринга и EOP(IERS)C04 составляет величину

$$\begin{aligned} d\psi(Herring) - d\psi(IERS) &= 42.60\, mas\,, \\ d\varepsilon(Herring) - d\varepsilon(IERS) &= 4.99\, mas\,, \end{aligned} \tag{2}$$

для интервала MJD=46000–50350 без существенного тренда. После учета этого смещения среднеквадратическое уклонение между `KSV_1996_3` и EOP(IERS)C04 составило 0.59 mas для $d\psi$ и 0.27 mas для $d\varepsilon$.

Для периода MJD=50000–50500 было получено

$$\begin{aligned} d\psi(Herring) - d\psi(IERS) &= 42.65\, mas\,, \\ d\varepsilon(Herring) - d\varepsilon(IERS) &= 4.93\, mas\,, \end{aligned} \tag{3}$$

а среднеквадратические разности между `KSV_1996_3` и EOP(IERS)C04 составили 0.54 mas для $d\psi$ и 0.24 mas для $d\varepsilon$. В 1997 г., по предложению автора, в модель IERS Conventions (1996) были включены эти величины смещения для лучшего соответствия модели данным наблюдений.

В **шестой главе** приведены результаты обработки GPS наблюдений. Впервые определены координаты пяти российских станций в глобальной координатной системе ITRF на сантиметровом уровне точности по GPS наблюдениям кампании BSL'93.

Получено новое сводное решение BSL'93 на основе комбинации шести результатов обработки, полученных в разных исследовательских группах из стран, участвующих в проекте. После определения и учета систематических различий между этими решениями все они были приведены к одной системе координат и осреднены. Новое решение имеет более высокую внутреннюю точность, чем существующее. В табл. 4 приведены высоты станций для обоих решений. Найденные систематические различия вызваны, в основном, проблемами учета положения фазового центра антенны приемника Ashtech. Показано, что неопределенность ориентации этого решения, хотя и меньшая, чем у существующего, приводит к абсолютным ошибкам координат станций на уровне 2–3 см. Возможно уточнение ориентации сводного решения с использованием более современных наблюдений и методик, в первую очередь с уточнением методов учета положения фазового центра GPS антенны и добавлением опорных станций в восточной части Балтийского региона.

В **седьмой главе** описано современное состояние работ по геодезическому обеспечению комплекса КВАЗАР.

Таблица 4. Высоты станций по результатам кампании BSL'93.

Станция	H (FGI)	H (ИПА РАН)
Hamina	16.736±0.011	16.767±0.005
Helsinki	23.807±0.010	23.832±0.003
Hanko	21.524±0.011	21.537±0.004
Degerby	20.494±0.011	20.512±0.007
Mäntyluoto	21.158±0.013	21.169±0.003
Vaasa	19.090±0.009	19.100±0.003
Raahe	19.845±0.015	19.859±0.003
Kemi	20.306±0.015	20.319±0.003
Furuögrund	32.818±0.012	32.823±0.002
Ratan	22.784±0.013	22.791±0.006
Spikarna	27.153±0.015	27.155±0.004
Stockholm 1	36.093±0.020	36.099±0.005
Stockholm 2	34.618±0.023	34.623±0.006
Visby	27.197±0.035	27.205±0.010
Ölands N.U.	31.374±0.028	31.380±0.006
Klagshamn	37.870±0.024	37.865±0.011
Tejn	36.731±0.020	36.732±0.007
Gedser	40.901±0.011	40.903±0.012
List/Sylt	44.680±0.033	44.662±0.003
Helgoland	43.559±0.052	43.553±0.022
Borkum	44.715±0.036	44.692±0.004
Travemünde	40.704±0.030	40.695±0.003
Warnemünde	59.610±0.028	59.614±0.004
Sassnitz	75.434±0.035	75.432±0.007
Swinoujscie	37.902±0.032	37.902±0.006
Ustka	33.878±0.031	33.892±0.010
Wladyslawowo	31.357±0.034	31.371±0.012
Svetlogorsk	50.789±0.012	50.814±0.007
Molas	29.325±0.009	29.348±0.005
Klaipeda	52.895±0.015	52.915±0.009
Liepaja	32.682±0.025	32.699±0.007
Skulte	26.435±0.010	26.457±0.002
Ristna	25.598±0.008	25.613±0.001
Tallinn	19.930±0.011	19.953±0.003
Gogland	20.276±0.008	20.303±0.001
Shepelevo	19.516±0.007	19.563±0.011
Vyborg	23.623±0.008	23.658±0.003

Разработаны принципы построения локальных геодезических сетей комплекса КВАЗАР и начата их реализация. Построены первые очереди ЛГС НП Светлое и Зеленчукская. Наиболее исследованной к настоящему времени является ЛГС НП Светлое, план которой приведен на рис. 1.

На НП Светлое оборудованы: четыре основных марки 101, 102, 107, 109, конструкция которых позволяет производить измерения как классическими, так и GPS средствами с принудительной центрировкой инструмента (теодолита, светодальномера, GPS антенны и т.д.), три основные марки 103, 104, 108 для классических и GPS наблюдений со штатива, а также несколько рабочих (с номерами, бо́льшими 150) и нивелирных марок.

В 1994-1996 гг. были проведены 9 сессий GPS измерений на НП Светлое. Для измерений применялись приемники Trimble 4000SST и Leica System 200, а обработка производилась пакетами Trimvec, GPSurvey, Ski, Bernese. Сводная обработка всех результатов, полученных с разными приемниками и программами, позволила оценить реальную точность определения взаимного положения марок ЛГС, которая составила в среднем около 1.5 мм, что примерно втрое превышает ошибку среднего из измерений с одним приемником, обработанными одной программой.

Для контроля параметров локальной сети, полученных из GPS наблюдений проводились нивелирные (точность около 0.1–0.3 мм в зависимости от длины базы) и светодальномерные (точность около 1.5 мм) наблюдения. Среднеквадратическое расхождение превышений, определенных из GPS и нивелирных измерений составило 1.7 мм, а расстояний – 3.0 мм.

На основе совместного анализа GPS, нивелирных и светодальномерных измерений можно сделать вывод, что реальная точность определения взаимного положения марок составляет 2–3 мм, что соответствует точности локальных сетей основных станций, образующих систему ITRF.

В 1990–1994 гг. проведены работы по привязке всех НП к отечественной геодезической сети. Точность привязки, произведенной по классической геодезической методике, составила около 0.5-1 м. Поскольку НП комплекса КВАЗАР будут включены в состав фундаментальной геодезической сети РФ, планируется повторная привязка НП к другим пунктам фундаментальной сети средствами спутниковой геодезии.

Первая привязка к глобальной системе координат ITRF произведена по наблюдениям DORIS, ведущимся с 1991 г. на НП Бадары. Обработка производится в нескольких центрах IERS. Результатом наблюдений за 1991–1995 гг. стало определение координат с ошибкой порядка 1.5–2 см.

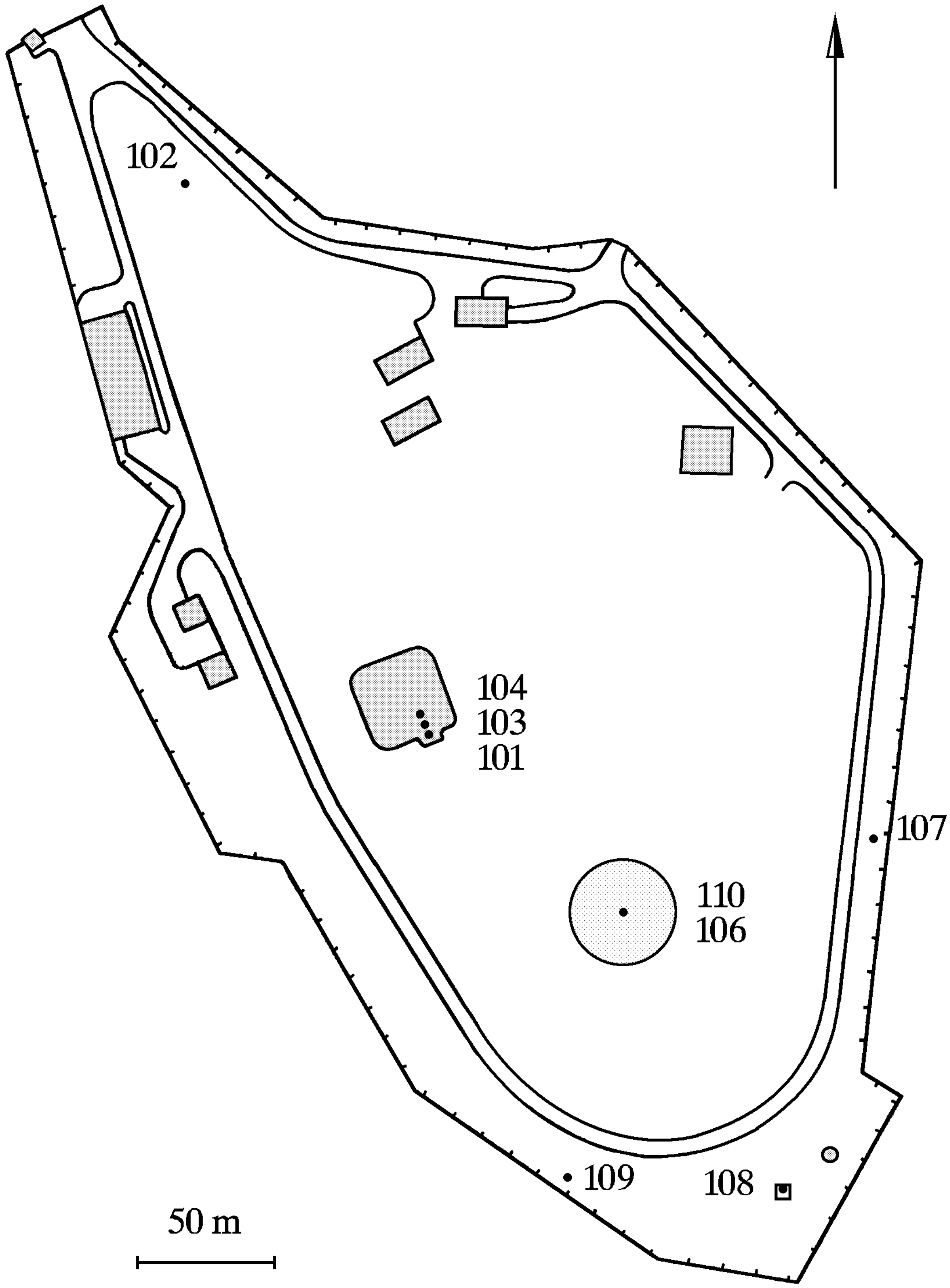

Рис. 1. Геодезическая сеть НП Светлое.

Наиболее надежные на сегодняшний день координаты НП Светлое в системе ITRF получены из обработки GPS наблюдений, проведенных в рамках кампании BSL'93. Были учтены также предварительные результаты кампании DOSE'93. В настоящее время точность привязки НП Светлое к системе ITRF составляет 3–4 см. С осени 1996 г. НП Светлое включен в состав постоянных станций Европейской опорной сети EUREF и с весны 1997 г. – в каталог IERS. Ведущаяся в настоящее время обработка непрерывных наблюдений позволит значительно улучшить привязку к глобальным геодезическим сетям.

Предварительные координаты НП Зеленчукская определены по GPS наблюдениям, проведенным в рамках проекта WEGENER, обработка которых проведена в IFAG. Предварительные результаты обработки наблюдений 1994 г. показали высокую точность по внутренней сходимости. Однако, имея в виду короткий период наблюдений (несколько дней) и расположение НП Зеленчукская вдали от хорошо определенных опорных станций, необходимы дополнительные измерения для уверенной привязки к глобальной системе координат.

В **восьмой главе** собраны результаты некоторых исследований в области алгоритмов анализа измерений, полученные при обработке классических и спутниковых наблюдений, описанных в предыдущих главах.

Рассмотрены возможные методические ошибки методов уравнивания наблюдений служб времени и широты. Предложен критерий, позволяющий априори оценить целесообразность применения методов уравнивания, учитывающих вечеровые изменения инструментальных параметров или результатов наблюдений. Этот критерий позволяет оценить минимальную статистически значимую скорость вечерового изменения изучаемого параметра b, исходя из случайной ошибки одного наблюдения σ_0 и средней продолжительности вечера $\Delta\alpha$ и среднего числа звезд, наблюдающихся за один вечер n:

$$|b| = \frac{\sigma_0}{\Delta\alpha}\sqrt{\frac{24(n-1)t^2_{q,n-2}}{n(n-2+t^2_{q,n-2})}}, \tag{4}$$

где $t_{q,n-2}$ – квантиль t-распределения, соответствующий доверительной вероятности $p = 2q - 1$.

Проведен сравнительный анализ шести методов уравнивания наблюдений: четырех описанных в литературе модификаций цепного метода, отличающихся разными подходами к уравниванию групп и приведению звезд к центру группы, известного метода наименьших квадратов для безгрупповых программ наблюдений МНК1 и модифицированного метода наименьших квадратов, предложенного в настоящей работе, МНК2. Различие последних двух методов состоит в следующем.

При применении МНК1 координаты звезд находятся из решения системы условных уравнений вида $\Delta a_i - \Delta a_j = x_j - x_i$, где Δa_i, Δa_j – поправки координат звезд, x_i, x_j – результаты определения широты (поправки часов) по этим звездам. Совокупность таких уравнений по всему периоду наблюдений образует избыточную систему, которая решается методом наименьших квадратов при наложении условия $\sum \Delta a = 0$.

При применении метода МНК2 избыточная система состоит из условных уравнений вида $\Delta a_i - \Delta a_j = \overline{x_j - x_i}$, где $\overline{x_j - x_i}$ – среднее по всему периоду наблюдений значение разностей $x_j - x_i$, каждая из которых получена по наблюдениям одного вечера. В отличие от МНК1, в этом методе веса поправок координат зависят только от числа звезд, совместно наблюдавшихся с данной звездой, и не зависят от числа наблюдений. Таким образом, система каталога оказывается независимой от распределения наблюдений внутри года.

Для тестирования перечисленных методов проведен ряд численных экспериментов с введением искусственных поправок, имитирующих различные виды систематических ошибок исходного каталога и ошибок наблюдений. Результаты тестирования показывают, что все рассмотренные методы уравнивания дают близкие результаты. Можно, однако, отметить, что предлагаемый метод МНК2 позволяет исключить систему исходного каталога существенно лучше, чем МНК1.

Предложенный метод уравнивания наблюдений МНК2 успешно применен для вывода каталогов звезд программ ФЗТ и ЗТФ-135.

Предложены простые и эффективные формулы для аппроксимации нормального распределения, распределений Стьюдента и $\zeta(Q,n)$, которые позволяют значительно упростить и ускорить вычисление квантилей этих распределений при сохранении достаточной для практических нужд точности.

Для аппроксимации функции, обратной к функции нормального распределения в наиболее интересном при обработке данных диапазоне доверительных вероятностей $p = 0.95 \ldots 0.99999$ можно предложить аппроксимирующую формулу

$$\Psi(p) = -0.795617 - 0.014665 \cdot t + 1.576687 \cdot \sqrt{t - 0.513114}\,, \qquad (5)$$

где $t = -\ln(1-p)$, которая обеспечивает ошибку аппроксимации меньше $1.5 \cdot 10^{-4}$.

Распределение $\zeta(Q,n)$ применяется для отбраковки выделяющихся измерений. Такое измерение считается выбросом, если выполняется условие $\frac{|v|}{s} > \zeta(Q,n)$, где v – остаточная невязка наблюдения, s – выборочная оценка дисперсии, $Q =$ – уровень значимости, n – число измерений. Апроксимация статистики $\zeta(Q,n)$ может быть произведена по формуле

$$\zeta(Q,n) = \Psi(p) \cdot \left(a_1 + a_2 \cdot n + \frac{a_3}{a_4 + n}\right) . \tag{6}$$

Вычислены значения параметров $a_1 - a_4$ для $Q = 0.05 \ldots 20$ в двух вариантах: для $n = 6 \ldots 500$ и для $n = 6 \ldots 100$. Ошибка аппроксимации меньше 0.007 в первом случае и меньше 0.003 во втором.

Для аппроксимации t-распределения предлагается использовать формулу

$$t(Q,m) = A \; + \; \frac{B}{m+C} , \tag{7}$$

где Q – уровень значимости, m – число степеней свободы. Вычислены значения параметров A, B, C для $Q = 0.05 \ldots 20$ для односторонней и двухсторонней области. Точность аппроксимации лучше 0.01 при $m > 6$.

Проведен сравнительный анализ алгоритмов сглаживания временных рядов методом Уиттекера: оригинального алгоритма Уиттекера, алгоритмов Юсупова и Вондрака. Показано, что все три алгоритма эквивалентны для равноотстоящих рядов (после корректировки алгоритма Юсупова). В то же время алгоритм Юсупова имеет определенные преимущества перед алгоритмом Вондрака для неравноотстоящих рядов, а также более удобен практически, поскольку при его применении результаты сглаживания не зависят от размерности аргумента. Рассмотрены возможности увеличения крутизны передаточной функции метода Уиттекера и использования его в качестве полосового фильтра.

В **девятой главе** описаны программный пакет для обработки SLR наблюдений GROSS и библиотека прикладных программ MAL, разработанные автором и представляющие собой единую программную систему для обработки SLR наблюдений и геодезических измерений на миллиметровом уровне точности.

Пакет GROSS (Geodynamics, Earth Rotation, Orbit determination Satellite Software) предназначен для решения следующих задач:

1. Прогнозирование орбит высокоорбитальных геодезических и навигационных ИСЗ (Lageos, Эталон, ГЛОНАСС, NAVSTAR).
2. Определение ПВЗ (Xp, Yp, LOD, UT1), координат и скоростей станций, параметров орбит, геофизических и геодезических параметров.
3. Решение задач геодезического обеспечения.

Пакет состоит из следующих основных частей:

1. Программы прогнозирования орбит;
2. Программы обработки наблюдений одной орбитальной дуги;
3. Программы глобальной обработки наблюдений нескольких орбитальных дуг;
4. Программы геодезического обеспечения;
5. Сервисные программы, обеспечивающие подготовку файлов, необходимых для работы пакета, предварительное тестирование входных данных, формирование файлов результатов в удобной для последующего использования форме, тестирование пакета и др.;
6. Библиотека математических, астрономических и сервисных стандартных подпрограмм общего назначения MAL для обеспечения вычислений на всех стадиях обработки наблюдений; основная часть подпрограмм библиотеки MAL не связана специально с обработкой наблюдений ИСЗ и имеет общее назначение.

Пакет, включая библиотеку MAL, тестовые программы, командные файлы и документацию, содержит около 1100 модулей общим объемом около 3 Мб. Примерно 80% модулей написано автором самостоятельно, около 15% модулей являются существенными модификациями программ других авторов и около 5% модулей других авторов использованы без изменений или с несущественными доработками.

В настоящей версии пакета GROSS полностью реализованы модели и алгоритмы IERS Standards (1992) с некоторыми расширениями. Частично реализованы алгоритмы IERS Conventions (1996).

Библиотека прикладных программ MAL (<u>M</u>athematical and <u>A</u>stronomical <u>L</u>ibrary) формировалась в течение нескольких лет параллельно с разработкой программного обеспечения для обработки различных наблюдательных данных. Часть программ являются общими для большинства библиотек прикладных программ аналогичного назначения (как, например, программы, реализующие простые матрично-векторные операции), другая часть является уникальной. Однако некоторые программы, реализующие такие простые операции, как, например, умножение матриц, написаны так, чтобы обеспечить максимальную эффективность при выполнении.

Всего библиотека MAL включает в себя около 600 модулей общего назначения, подавляющая часть которых написана на языке Fortran. Около 93% модулей написано автором, остальные модули являются доработкой программ других авторов. Библиотека MAL содержит следующие разделы (хотя деление на разделы, иногда, условно):

1. Астрономические программы;
2. Спутниковые программы общего назначения;
3. Геодезические программы;
4. Математические программы;
5. Сервисные программы.

По мере развития программного обеспечения для обработки наблюдений, библиотека MAL непрерывно пополняется новыми модулями. Существующие модули модернизируются для повышения эффективности их работы.

Как показал опыт работы последних лет, библиотека MAL содержит достаточно универсальный набор функций для обеспечения многих задач обработки астрономических наблюдений, который может быть непосредственно использован в прикладных программах или служить основой для создания новых стандартных модулей общего назначения.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в диссертации.

Основные результаты опубликованы в работах:

1. *Губанов В.С., Малкин З.М.* Об определении параметров свободной суточной нутации Земли из астрономических наблюдений. В кн.: Материалы пленума Комиссии по изучению вращения Земли Астрономического совета АН СССР, Киев, 1974, 52–55.

2. *Малкин З.М.* О вычислении масштаба ФЗТ. Изв. ГАО АН СССР, 1980, № 197, 55–64.

3. *Наумов В.А., Малкин З.М.* Системы регистрации времени Пулковской ФЗТ2. Изв. ГАО АН СССР, 1980, № 197, 50–54.

4. *Малкин З.М.* Предварительный каталог прямых восхождений звезд программы ФЗТ на международной параллели. Изв. ГАО АН СССР, 1982, № 199, 41–42.

5. *Вытнов В.А., Литвиненко Е.А., Малкин З.М., Наумов В.А.* Организация службы времени на Китабской международной широтной станции. Изв. ГАО АН СССР, 1982, № 200, 105–106.

6. *Малкин З.М.* Каталог прямых восхождений звезд программы ФЗТ на международной параллели. Деп. в ВИНИТИ 10.01.83, № 130-83деп.

7. *Малкин З.М.* Новый метод вычисления масштаба ФЗТ. Астрон. Цирк., 1983, № 1262, 6–7.

8. *Малкин З.М.* О выборе оптимальной конструкции павильона для зенитной трубы. Деп. ВИНИТИ 24.08.83, № 4619-83деп.

9. *Наумов В.А., Калмыков А.М., Литвиненко Е.А., Малкин З.М.* Павильон ФЗТ-2 в Китабе и его влияние на результаты наблюдений. В кн.: Вращение Земли и геодинамика (Труды Всесоюзного совещания, г. Китаб, 12–14 ноября 1981 г.), Ташкент, 1983, 168–173.

10. *Горшков В.Л., Малкин З.М.* Уравнивание наблюдений службы времени методом наименьших квадратов. Астрон. Цирк., 1983, № 1263, 5–6.

11. *Малкин З.М.* Метод ежедневного контроля азимута ФЗТ. Астрон. Цирк., 1984, № 1349, 7–8.

12. *Малкин З.М.* Инструментальные ошибки ФЗТ. Деп. ВИНИТИ 18.10.84, № 6758-84деп.

13. *Малкин З.М.* Сравнение различных методов уравнивания наблюдений времени и широты. Астрон. Журн., 1985, **62**, № 1, 166–171.

14. *Малкин З.М.* Зависимость результатов определения всемирного времени на ФЗТ в Китабе от конфигурации крыши павильона. В кн.: Проблемы определения параметров вращения Земли, Владивосток, 1986, 68–70.

15. *Малкин З.М.* О приведении наблюдений ФЗТ на меридиан. В кн.: Проблемы определения параметров вращения Земли, Владивосток, 1986, 70–77.

16. *Малкин З.М.* Зависимость масштаба ФЗТ в Китабе от цвета звезды. Изв. ГАО АН СССР, 1987, № 204, 48–51.

17. *Глебова Л.А., Малкин З.М., Наумов В.А.* Цена оборота винта зенит-телескопа Бамберга на о. Западный Шпицберген по наблюдениям шкальных рядов. Изв. ГАО АН СССР, 1988, № 205, 33–39.

18. *Костина Л.Д., Малкин З.М., Персиянинова Н.Р.* Определение главного члена нутации по наблюдениям с ЗТФ-135 в 1948–1967 гг. В кн.: Изучение Земли как планеты методами геофизики, геодезии и астрономии (Труды II Орловской конф.), Киев, 1988, 8–10.

19. *Стрелецкий Ю.С., Остренский Ю.Г., Ершов В.Н., Малкин З.М., Наумов В.А.* Фотоэлектрическая зенитная труба. Wiss. Z. Techn. Univ. Dresden, 1989, No 38, H. 2, 109–112.

20. *Glebova, L.A., Kostina, L.D., Malkin, Z.M., Persiyaninova, N.R.* The Determination of the Principal Nutation Terms from the Observations with ZTF-135 in 1948.7–1989.0. In: J.H.Lieske, V.K.Abalakin (eds.), Inertial Coordinate System on the Sky (Proc. 141st Symp. IAU), 1990, 153–154.

21. *Малкин З.М.* Простое вычисление квантилей t-распределения. Астрон. Цирк., 1993, № 1554, 43.

22. *Малкин З.М.* Некоторые особенности солнечного излучения и функция тени. В кн.: Конференция с международным участием "Теоретическая, прикладная и вычислительная небесная механика", Тезисы докладов, СПб., 1993, 30–31.

23. *Малкин З.М.* Об исключении резко выделяющихся измерений. Астрон. Цирк., 1993, № 1555, 33–34.

24. *Malkin, Z.M.* SIRIUS as a Geodetic Tool. In: J.Campbell, A.Nothnagel (eds.), Proc. 9th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Bad Neuenahr, 30 Sept. – 1 Oct. 1993, 36–38.

25. *Малкин З.М.* О выборе оптимальных параметров интегратора. В кн.: Международная конференция "Современные проблемы теоретической астрономии", Тезисы докладов, т. 3, СПб., 1994, 63–65.

26. *Малкин З.М.* Об учете параметров ориентации Земли при интегрировании орбит ИСЗ. В кн.: Международная конференция "Современные проблемы теоретической астрономии", Тезисы докладов, т. 3, СПб., 1994, 66–68.

27. *Малкин З.М.* Обработка SLR наблюдений в ИПА РАН. В кн.: 5 Российский симпозиум "Метрология времени и пространства", Тезисы докладов, М., 1994, 69.

28. *Malkin, Z.M.* First SLR results from IAA. In: Proc. Sixth General Assembly of WEGENER, St.Petersburg, June 20th – June 24th, 1994, 417.

29. *Малкин З.М.* Обработка SLR наблюдений в ИПА РАН. 1. Редукционная обработка и определение ПВЗ. Сообщ. ИПА РАН, 1995, № 72.

30. *Malkin, Z.M.* EOP in orbit integration (abstract). Annales Geophysicae, 1995, Part 1, Supplement 1 to v.13, C174.

31. *Malkin, Z.M.* Sun peculiarities and shadow function (abstract). Annales Geophysicae, 1995, Part 1, Supplement 1 to v.13, C174.

32. *Malkin, Z.M.* On a choice of the optimal parameters for orbit integrator (abstract). Annales Geophysicae, 1995, Part 1, Supplement 1 to v.13, C174.

33. *Springer, T.A., Malkin, Z.M.* Analysis of the Baltic Sea Level 1993 GPS Campaign. In: J.Kakkuri (ed.), Final results of the Baltic Sea Level 1993 GPS Campaign, Rep. Finn. Geod. Inst., 1995, **95:2**, 87–104.

34. *Казаринов А.С., Кумкова И.И., Малкин З.М., Смоленцев С.Г., Олифиров В.Г., Тарбеев Ю.В., Челомбитько А.М.* Геодезическое обеспечение радиоинтерферометрического комплекса "КВАЗАР". В кн.: XXVI радиоастрономическая конференция, Тезисы докладов, СПб., 1995, 334–335.

35. *Malkin, Z.M.* Earth rotation parameters from Lageos1&2 SLR observations. In: IERS Technical Note 19, Paris, 1995, L29–L32.

36. *Малкин З.М.* Инструментальные ошибки зенитной трубы. Сообщ. ИПА РАН, 1996, № 85.

37. *Malkin, Z., Skurikhina, E.* On Prediction of EOP. Communications of IAA, 1996, № 93.

38. *Казаринов А.С., Малкин З.М., Верещагин С.Г., Комаров Ю.П.* Первая очередь локальной геодезической сети НП Светлое. Сообщ. ИПА РАН, 1996, № 95.

39. *Малкин З.М.* Обработка SLR наблюдений в ИПА РАН. В кн.: Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Тезисы докладов, СПб., 1996, 90–91.

40. *Малкин З.М.* Международный проект "Уровень Балтийского моря" (BSL). В кн.: Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Тезисы докладов, СПб., 1996, 109–111.

41. *Малкин З.М.* Служба ПВЗ ИПА РАН. В кн.: Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Тезисы докладов, СПб., 1996, 114–115.

42. *Малкин З.М.* Некоторые статистические характеристики SLR наблюдений. В кн.: Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Тезисы докладов, СПб., 1996, 124–125.

43. *Малкин З.М., Скурихина Е.А.* О прогнозировании ПВЗ. В кн.: Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", Тезисы докладов, СПб., 1996, 125–126.

44. *Малкин З.М.* Обработка SLR наблюдений в ИПА РАН. В кн.: Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики, Труды конф., СПб., 1996, 252–258.

45. *Малкин З.М.* Международный проект "Уровень Балтийского моря" (BSL). В кн.: Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики, Труды конф., СПб., 1996, 300–307.

46. *Малкин З.М., Скурихина Е.А.* О прогнозировании параметров вращения Земли. В кн.: Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики, Труды конф., СПб., 1996, 336–343.

47. *Finkelstein, A.M., Malkin, Z.M.* Svetloe as a possible future fiducial site for geodynamics in the Baltic region. In: Proc. First Workshop of the Subcommission IAG SSC 8.1 "Studies of Baltic Sea", Riga, March 28–29, 1996, 12–17.

48. *Малкин З.М.* О сглаживании методом Уиттекера. Кинем. и Физ. Неб. Тел, 1996, **12**, № 4, 92–96.

49. *Костина Л.Д., Малкин З.М., Персиянинова Н.Р.* Предварительные результаты наблюдений широт, полученных по 7-ой широтной программе с ЗТФ-135 в Пулкове. Изв. ГАО РАН, 1996, № 210, 152–156.

50. *Bajkova, A., Finkelstein, A., Krasinsky, G., Malkin, Z., Pyatunina, N., Vasilyev, M., Voinov, A.* IAA Program Packages for Astrometric and Geodetic Data Analysis. In: Proc. Technical Workshop for APT and APSG 1996, Kashima, Dec 10–13, 1996, 247–251.

51. *Малкин З.М.* Определение параметров вращения Земли из SLR наблюдений в ИПА РАН. Труды ИПА РАН, вып. 1, 1997, 113–132.

52. *Малкин З.М., Петров Л.Ю., Финкельштейн А.М., Воинов А.В., Скурихина Е.А.* Служба определения ПВЗ ИПА РАН. Труды ИПА РАН, вып. 1, 1997, 101–112.

53. *Шпрингер Т.А., Малкин З.М.* Обработка GPS наблюдений кампании BSL'93. Труды ИПА РАН, вып. 1, 1997, 170–183.