РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ

На правах рукописи

ГАЯЗОВ Искандар Сафаевич

Использование высокоточных наблюдений геодезических и навигационных ИСЗ для решения задач геодинамики

Специальность 01.03.01 - “Астрометрия и небесная механика”

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург
2004

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук	Н. В. Емельянов
доктор физико-математических наук, профессор	Г. А. Красинский
доктор технических наук, профессор	С. Н. Яшкин

Ведущая организация:

Институт астрономии РАН

Защита состоится 22 сентября 2005 г. в 10 час. на заседании диссертационного совета Д 002.067.01 в Институте прикладной астрономии РАН по адресу: 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института прикладной астрономии РАН.

Автореферат разослан "____" августа 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физ.-мат. наук З.М.Малкин

Общая характеристика работы

Высокая точность современных спутниковых наблюдений позволяет решать широкий круг задач, связанных с изучением планетарных характеристик Земли. Диссертация посвящена исследованию и развитию методов обработки высокоточных наблюдений ИСЗ и их применению для решения некоторых задач геодинамики. Разработаны и исследованы динамические модели, используемые для высокоточного прогнозирования орбит геодезических и навигационных ИСЗ при обработке их наблюдений. Из обработки лазерных наблюдений геодинамических спутников определены долговременные вариации коэффициентов низших гармоник гравитационного поля Земли, которые позволяют оценить амплитуду колебаний внутреннего ядра, а также изучить сезонные вариации положения геоцентра и эволюцию динамического сжатия Земли. Из обработки фазовых измерений навигационных спутников GPS получены ряды параметров вращения Земли, которые используются для получения сводных решений в Международной службе вращения Земли.

Актуальность темы диссертации

В последние десятилетия произошло значительное повышение точности средств измерений и методов, используемых для исследования Земли как планеты. Современные технологии спутниковых наблюдений и методы спутниковой геодинамики в этом ряду занимают уникальное положение благодаря таким характеристикам, как высокая точность, оперативность получения данных наблюдений, а также благодаря возможности их использования для изучения кинематических и динамических параметров Земли в единой связке. Современная точность спутниковых измерений методами SLR (Satellite Laser Ranging) и GPS (Global Positioning System) находится на таком уровне, что позволяет определять не только стационарные характеристики Земли, но и вариации ее параметров в широком диапазоне частот. Получаемые при этом данные позволяют не только изучать геодинамические процессы, происходящие на уровне взаимодействия коры, океана и атмосферы, но также вплотную подойти к решению проблем, связанных с глобальной эволюцией Земли и с особенностями ее внутреннего строения. Кроме того, данные, получаемые спутниковыми методами, имеют важное значение для задач фундаментального и прикладного координатно-временнóго обеспечения. С другой стороны, все это потребовало разработки новых методов анализа наблюдений, создания новых моделей, определения их параметров для более точного описания вращения Земли, динамики ИСЗ, измененений гравитационного поля Земли, а также колебаний земной поверхности, уровня океана и центра масс Земли — начала фундаментальных систем отсчета. Поэтому исследования, направленные на повышение точности анализа спутниковых наблюдений и на разработку адекватных моделей, несомненно, являются актуальными.

Цели работы

Основными целями настоящей работы являются:

1. Разработка динамических моделей для высокоточного прогнозирования движения среднеорбитальных ИСЗ и исследование их точности.
2. Создание долгосрочного эфемеридного обеспечения среднеорбитальных ИСЗ.
3. Разработка и исследование методик определения спутниковых и геодинамических параметров по наблюдениям геодезических и навигационных ИСЗ.
4. Создание в рамках службы параметров вращения Земли ИПА РАН подсистемы определения ПВЗ по GPS-измерениям глобальной сети.
5. Определение вариаций геодинамических параметров по лазерным наблюдениям и их геофизическая интерпретация.

Научная новизна работы

1. Разработаны динамические модели, используемые в высокоточной численной теории движения геодезических и навигационных ИСЗ: оптимизированная модель океанических приливов, уточненная модель полюсного прилива, эмпирическая модель светового давления, учитывающая также тонкие эффекты прохождения спутника через тень Земли.
2. Впервые из обработки лазерных наблюдений на длительном интервале выполнено совместное определение вариаций коэффициентов первой и второй степени геопотенциала, характеризующих глобальные геодинамические процессы.

3. Впервые динамическим методом получен линейный тренд оси фигуры Земли и на основе его сравнения с данными о вековом движении полюса получена верхняя оценка амплитуды колебаний внутреннего ядра Земли.
4. Получены новые данные о сезонных вариациях положения геоцентра и эволюции динамического сжатия Земли.
5. Разработаны методика и программные средства, позволяющие проводить совместную обработку лазерных наблюдений геодинамических спутников и фазовых измерений навигационных ИСЗ, вносящих наибольший вклад в решение задач современной геодинамики.
6. Создана автономная система долгосрочного эфемеридного обеспечения среднеорбитальных ИСЗ на основе разработки полуаналитических алгоритмов прогноза орбит повышенной точности.

Научная и практическая значимость работы

1. Разработанные аналитические алгоритмы применялись при исследовании влияния возмущающих факторов на орбиты геодинамических и навигационных спутников, а также для оптимизации представления динамических моделей, используемых в алгоритмах высокоточного численного интегрирования.
2. Разработанные динамические модели, методики и программные средства обработки наблюдений используются в службе определения ПВЗ, для определения орбит спутников и параметров тропосферы.
3. Полученные ряды параметров вращения Земли используются для получения сводных решений в Международной службе вращения Земли.
4. Результаты определения коэффициентов низших гармоник геопотенциала могут быть использованы для изучения геодинамических процессов.
5. Эффективная методика вычисления изохронных производных может быть применена при уточнении орбит в режиме реального времени.
6. Разработанная система эфемеридного обеспечения использовалась в нескольких отечественных и зарубежных организациях, проводящих наблюдения спутников, а ее составные части — также при создании долгосрочной эфемеридной службы геостационарных ИСЗ.

Результаты, выносимые на защиту:

1. Эмпирическая модель светового давления для навигационных спутников, обеспечивающая точность вычисления орбит спутников GPS на сантиметровом уровне.
2. Ряды параметров вращения Земли и параметров орбит спутников, полученных из обработки GPS-измерений глобальной сети методом тройных разностей фаз.
3. Сезонные вариации положения геоцентра, эволюция средней оси фигуры и коэффициента динамического сжатия Земли, определенные совместно из обработки лазерных наблюдений геодинамических спутников.
4. Оценки числа Лява для полюсного прилива и амплитуды долгопериодических колебаний внутреннего ядра Земли, полученные из анализа наблюдений геодинамических спутников.
5. Автономная система эфемеридного обеспечения среднеорбитальных ИСЗ на основе полуаналитических алгоритмов повышенной точности, учитывающих все основные возмущения в движении спутников.

Апробация работы

Результаты, полученные в диссертации, представлялись на следующих конференциях:

Всесоюзная конференция “Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики”, Киев, 1982 г.;

Международная конференция “Использование наблюдений ИСЗ для целей геодезии и геофизики”, Суздаль, 1982 г.;

Всесоюзная конференция “Исследование гравитационного поля и природных ресурсов Земли космическими средствами”, Львов, 1984 г.;

Международный симпозиум “Etalon-91”, Москва, 1991 г.;

Международная конференция “Astrometry and Celestial Mechanics”, Познань, 1993 г.;

Международная конференция “Современные проблемы теоретической астрономии”, С.-Петербург, 1994 г.;

Конференция “Программы наблюдений высокоорбитальных спутников Земли и небесных тел Солнечной системы”, С.-Петербург, 1994 г.;

Генеральная Ассамблея Европейского геофизического союза (EGS), Гамбург, 1994 г.;

Всероссийская конференция с международным участием "Компьютерные методы небесной механики-95", С.-Петербург, 1995 г.;

Конференция "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики", С.-Петербург, 1996 г.;

Конференция "Наблюдения естественных и искусственных тел Солнечной системы", С.-Петербург, 1996 г.;

Всероссийская конференция с международным участием "Компьютерные методы небесной механики-97", С.-Петербург, 1997 г.;

Конференция "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века", С.-Петербург, 2000 г.;

Рабочее совещание Международной сети IGS ("IGS Network Workshop"), Осло, 2000 г.;

Всероссийская астрономическая конференция, С.-Петербург, 2001 г.;

Международная конференция "Небесная механика-2002", С.-Петербург, 2002 г.;

Международная конференция "Journees 2003 (Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from Milliarcseconds to Microarcseconds)", С.-Петербург, 2003 г.;

Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временно́е обеспечение (КВО-2005)", С.-Петербург, 2005 г.

Публикации и вклад автора

Основные результаты диссертации опубликованы в 31 работе общим объемом 217 страниц. 9 работ написаны совместно с другими авторами. В совместных работах автору принадлежат: [11, 12] — получение аналитических разложений для возмущающих функций, разработка алгоритмов вычисления возмущений; [15] — разработка системы эфемеридного обеспечения на основе полуаналитических алгоритмов; [16] — постановка задачи, исследование точности численного интегрирования орбит геодинамических спутников; [18] — разработка пакета ITALAS для определения ПВЗ из обработки лазерных наблюдений; [20] — участие в наблюдательной программе и в обработке данных наблюдений; [22, 23] — постановка задачи, разработка и исследование точности динамических моделей, разработка орбитального блока пакета GRAPE; [30] — обработка GPS-измерений глобальной сети для определения ПВЗ.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Она изложена на 217 страницах, содержит 74 рисунка и 33 таблицы. В списке литературы 162 наименования.

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.

Первая глава посвящена анализу современного состояния методов спутниковой геодинамики. В ней проведены сравнительный анализ лазерных наблюдений геодезических спутников и фазовых измерений навигационных спутников, общий анализ методов их обработки, а также анализ точности и полноты моделей, используемых в спутниковой геодинамике. Их основные положения сводятся к следующему:

1. Лазерные наблюдения геодинамических ИСЗ и фазовые измерения GPS-спутников вносят наиболее существенный вклад в решение задач глобальной геодинамики. Особенности их наблюдений диктуют различные методы обработки и различные интервалы обработки, а особенности орбит спутников определяют задачи, которые решаются лучше каждым из методов.

2. Достигнутый уровень точности этих измерений предъявляет высокие требования к применяемым методам обработки и к точности используемых моделей. Поскольку современные численные методы обеспечивают очень высокую точность прогнозирования орбит, основные источники ошибок, определяющих точность обработки наблюдений, лежат в области используемых динамических и кинематических моделей. Следовательно, разработка и параметризация этих моделей, уточнение их параметров из наблюдений составляют главное направление исследований. Алгоритмы перехода из одной фундаментальной системы отсчета в другую являются в достаточной степени стандартизованными и здесь основная задача

сводится к определению параметров вращения Земли из наблюдений. Алгоритмы моделирования эффектов, влияющих на положения пунктов наблюдений, также стандартизованы и весьма точны. В гораздо меньшей степени это относится к моделированию эффектов, возмущающих орбиты спутников. Поэтому основное внимание в диссертации уделено динамическим моделям.

3. В связи со значительным повышением точности параметров гравитационного поля Земли в высокочастотной области на первый план выходит необходимость уточнения коэффициентов гармоник низших степеней, а также определения временны́х вариаций этих коэффициентов. Для определения долговременных и нерегулярных изменений гравитационного поля и фигуры Земли из анализа высокоточных спутниковых наблюдений особенно важны вопросы моделирования известных геодинамических эффектов. Поэтому рассмотрены вопросы определения положения геоцентра и вековых изменений коэффициентов второй степени, а также точности моделей приливов, рекомендуемых Соглашениями IERS (McCarthy, 2004).

С применением методики анализа разностей высот геоидов были определены компоненты взаимных отклонений центров инерции планетарных геоидов, соответствующих трем современным моделям геопотенциала: EGM96 (Lemoine et al, 1998), EIGEN-GRACE (2003), GGM01-GRACE (2003). Показано, что смещение центра инерции модели EGM96 относительно центров моделей, полученных по проекту GRACE, составляет около 2 мм, а центры моделей GRACE согласуются в пределах 1 мм. Анализ методов определения вариаций положения геоцентра показывает, что динамический метод дает более устойчивые результаты, так как орбиты спутников выступают как своеобразный сглаживающий фильтр.

Точность геодинамических моделей, отражающих приливные вариации геопотенциала, определяется точностью частотно-зависимых поправок к номинальным значениям чисел Лява, а также нагрузочных коэффициентов, характеризующих реакцию поверхности суши и океана на переменную нагрузку. Поскольку лунно-солнечные приливы вызывают в движении спутников в основном долгопериодические возмущения, существенное уточнение этих параметров возможно только при обработке спутниковых наблюдений на длительных орбитальных дугах. В связи с тем, что значения нагрузочных чисел по абсолютной величине очень медленно убывают со степенью гармоники, при учете влияния океанических приливов на движение спутника необходимо использовать разложения до более высоких степеней, чем для твердотельных приливов. Использование детальных моделей океанических приливов, полученных из спутниковых альтиметрических измерений, требует предварительного анализа и оптимизации. Рекомендованное в Соглашениях IERS значение числа Лява для полюсного прилива дано без должного обоснования и необходимо его уточнение.

Во второй главе, посвященной описанию разработанной системы долгосрочного эфемеридного обеспечения среднеорбитальных ИСЗ, изложены полуаналитические алгоритмы, разработанные с учетом всех основных возмущений в движении среднеорбитальных ИСЗ, приведены результаты исследования точности алгоритмов и даны характеристики созданной системы эфемеридного обеспечения.

Требования к системе эфемеридного обеспечения для инструментов с автоматическим управлением наряду с заданными характеристиками точности включали и ее автономность, т.е. возможность получения эфемеридных данных для данной станции из обработки собственных наблюдений. Исходя из этого, при разработке средств эфемеридного обеспечения наблюдений спутников использован комплексный подход, включающий определение средних элементов орбит по наблюдениям и вычисление по ним эфемерид для проведения наблюдений.

Разработанные средства эфемеридного обеспечения основаны на полуаналитической теории движения спутников, в которой учитываются все основные возмущающие эффекты: несферичность Земли, притяжение Солнца и Луны (включая основные неравенства), твердотельные приливы, неинерциальность системы отсчета, связанной с текущим экватором, и световое давление. Суммарные вековые возмущения определяются из наблюдений, а не по теории, что обеспечивает применимость алгоритмов на длительных интервалах.

Теория Акснеса второго порядка (Aksnes, 1970) используется для учета 2-ой, 3-ей и 4-ой зональных гармоник геопотенциала. Общие выражения для остальных гравитационных возмущений (от высших зональных и тессеральных гармоник геопотенциала, от Солнца и Луны, включая неравенства в ее движении) получены интегрированием уравнений Лагранжа с применением известного формализма Каула (Kaula, 1966) для разложения возмущающих функций на основе хорошо разработанного аппарата преобразования сферических функций. Этот подход позволяет получить ряды для возмущений, содержащие в целом более 50 тысяч членов, в весьма компактном виде. При этом учитываются также эффекты взаимодействия периодических возмущений с вековыми от второй зональной гармоники.

Возмущающая функция от притяжения Солнца выражается через экваториальные элементы орбит спутника и Солнца. Использование средних элементов орбиты Солнца, представляющих его движение с точностью не хуже 10^{-4} в геоцентрических кординатах, позволяет построить алгоритм вычисления возмущений для спутников типа Лагеос с точностью около 0.1 м. Однако в случае Луны для достижения такой же точности необходимо не только использовать элементы орбиты, отнесенные к эклиптике, но и учитывать основные неравенства в движении Луны, которые могут вызывать возмущения в орбите спутников ЛАГЕОС до 10 м. При этом сферические координаты Луны представляются в виде главной и дополнительной частей, где первые слагаемые соответствуют движению по прецессирующей эллиптической орбите, а поправки — отклонениям истинного движения Луны от этой промежуточной орбиты. Амплитуды членов тригонометрических рядов, представляющих эти отклонения, были получены из рядов Хилла-Брауна по методике, использованной в работе (Cok, 1976). Она сводится к модификации рядов Хилла-Брауна с тем, чтобы исключить из них ту часть, которая отвечает за движение Луны на промежуточной орбите в виде прецессирующего эллипса, а также членов с амплитудами меньше некоторой заданной величины. В рядах, полученных при сохранении членов с амплитудами больше чем $3 \cdot 10^{-5}$ рад, число членов составляет: 26 — для синуса параллакса, 25 — для эклиптической широты и 31 — для долготы Луны. Путем сравнения с точными эфемеридами Луны было установлено, что полученные отрезки рядов представляют движение Луны с точностью не хуже 10^{-4} рад. При учете возмущений, вызываемых лунно-солнечными приливами твердой Земли, используются экваториальные элементы орбит Солнца и Луны. Для учета возмущений от светового давления используется эффективный метод Козаи-Акснеса, основанный на интегрировании уравнений Лагранжа в гауссовой форме по экцентрической аномалии в пределах освещенного Солнцем участка орбиты.

Анализ точности разработанных полуаналитических алгоритмов был проведен на основе сравнения с численным интегрированием орбиты спутника ЛАГЕОС 1. Путем численного интегрирования уравнений движения с учетом определенной комбинации возмущающих факторов строилась траектория спутника. Далее, используя сетку полученных координат в качестве наблюдений, методом дифференциального исправления на основе аналитического алгоритма прогноза определялись средние элементы орбиты и вековые возмущения в элементах ω, Ω и M. При этом учитывалась та же модель возмущающих факторов, которая была использована в численном интегрировании. Несмотря на то, что определяемые при дифференциальном исправлении средние элементы и их скорости способны поглотить часть ошибок долгопериодического характера, для проверки точности учета возмущений с относительно коротким периодом (до 10 суток) применение данного способа вполне оправдано.

Дифференциальное исправление проводилось на двух интервалах: 0.6 суток и 6 суток. Среднеквадратические значения остаточных разностей в сферических координатах спутника для различных вариантов модели возмущающих факторов даны в табл. 1.

Таблица 1. RMS остаточных разностей в сферических координатах при сравнении аналитичесой теории с численным интегрированием.

Возмущающие факторы	Интервал сут.	RMS в метрах		
		Δr	$r\Delta\phi$	$r\Delta\lambda$
C_{lm}, S_{lm} до (3,3)	6.0	0.17	0.27	0.33
J_2 + Солнце	0.6	0.06	0.08	0.09
J_2 + Солнце	6.0	0.09	0.34	0.48
J_2 + Луна	0.6	0.10	0.06	0.07
J_2 + Луна	6.0	0.35	0.47	0.89

Полученные результаты вычислений позволяют судить, что для среднеорбитальных спутников типа ЛАГЕОС точность учета короткопериодических возмущений в разработанных полуаналитических алгоритмах составляет 10–20 см, а долгопериодических возмущений — около 1 м на интервалах до 10 суток. Дальнейшее повышение точности аналитических алгоритмов возможно только при учете всех эффектов взаимодействия различных возмущающих факторов. Это настолько усложняет процедуру получения выражений для возмущений, а также увеличивает объем необходимых вычислений, что использование аналитических теорий становится даже менее эффективным, чем численное интегрирование. В этом смысле достигнутые для среднеорбитальных спутников точности аналитических алгоритмов прогноза орбит можно считать близкими к предельным.

Таким образом, были разработаны эффективные полуаналитические алгоритмы, учитывающие все основные возмущения, действующие на движение среднеорбитальных ИСЗ и на основе этих алгоритмов создана автономная система эфемеридного обеспечения среднеорбитальных спутников. Некоторые из разработанных аналитических алгоритмов применялись при исследовании характера влияния отдельных возмущающих факторов на орбиты спутников ЛАГЕОС и GPS, а также для оптимизации представления динамических моделей, используемых в алгоритмах высокоточного численного интегрирования.

Третья глава содержит результаты разработки и исследования методики определения спутниковых и геодинамических параметров по наблюдениям ИСЗ на основе ч и с л е н н о й теории движения. Полная реализация такой методики требует проведения исследований по отдельным ее составляющим:

• методическая точность интегратора, реализующего численное решение уравнений движения с учетом различных гравитационных и негравитационных эффектов;

• математические модели учитываемых эффектов и их адекватность;

• параметризация эмпирических моделей (определение их оптимальной структуры, интервалов пригодности и т.д.);

• оценка параметров моделей из обработки измерений;

Для численного интегрирования уравнений движения ИСЗ используется одношаговый интегратор предикторно-корректорного типа DINCH с равномерной аппроксимацией решения отрезком чебышевских разложений (Беликов, 1990). Интегратор способен эффективно преодолевать трудности, связанные с разрывами правых частей уравнений движения при заходе (и выходе) спутника в тень. Анализ методической точности интегрирования уравнений движения спутника при многократном пересечении границ тени Земли показал, что DINCH является одним из лучших интеграторов для применения в спутниковых задачах.

В зависимости от постановки задачи приобретают важное значение также вопросы корректного использования уравнений в вариациях для параметров и оптимизация процесса решения этих уравнений. Особенности интегрирования уравнений в вариациях были подробно рассмотрены в двух аспектах.

Первый — это учет вклада динамических частей в частных производных для параметров вращения Земли. Поскольку параметры вращения Земли достаточно быстро меняются со временем, необходимо различать текущие значения параметров p_t, значения на начальную эпоху интегрирования уравнений движения p_0, и значения p_f для фиксированного момента, на который они определяются из наблюдений. В этом случае для производных топоцентрического вектора $\boldsymbol{\rho}$ по ПВЗ можно записать:

$$\frac{\partial \boldsymbol{\rho}}{\partial p_f} = \left[\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_0} \frac{\partial p_0}{\partial p_f} - \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial p_t} \frac{\partial p_t}{\partial p_f} \right].$$

где $\mathbf{r}, \mathbf{R}$ — геоцентрические радиус-векторы спутника и станции наблюдения. Величины $\frac{\partial p_0}{\partial p_f}$ и $\frac{\partial p_t}{\partial p_f}$ определяются дифференцированием полиномов, используемых для интерполяции ПВЗ, а $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_0}$ — из интегрирования вариационных уравнений. Вклад последней мал, однако он зависит от возмущений и растет по мере удаления от начальной эпохи. Интегрирование выведенных вариационных уравнений для $\frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_0}$ показало, что вклад динамических частей при использовании спутников ЛАГЕОС на интервале 5 суток составляет 2–3 % от кинематических частей производных по ПВЗ. Поскольку в случае GPS-спутников возмущения от геопотенциала существенно меньше и ПВЗ определяются на суточных интервалах, вклад динамических частных производных можно не учитывать.

Второй аспект связан с оптимизацией вычисления изохронных производных при уточнении орбит большого ансамбля навигационных спутников (GPS, ГЛОНАСС, а в будущем и GALILEO). Была предложена модификация методики перемножения переходных матриц при вычислении матриц изохронных производных:

$$\mathbf{J}(t, t_0) = \mathbf{J}(t, t_1)\ \mathbf{J}(t_1, t_0).$$

Кеплеровский матрицант $\mathbf{J}$ на каждом участке орбиты вычисляется по $f, g, \dot{f}, \dot{g}$, которые определяются из решения систем:

$$\begin{aligned} f\mathbf{r}_0 + g\dot{\mathbf{r}}_0 &= \mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \\ \dot{f}\mathbf{r}_0 + \dot{g}\dot{\mathbf{r}}_0 &= \dot{\mathbf{r}} + \Delta\dot{\mathbf{r}}. \end{aligned}$$

при условии минимизации отклонений от кеплеровой орбиты $\Delta\mathbf{r}, \Delta\dot{\mathbf{r}}$, вызванных возмущениями. Такой подход позволяет неявно учитывать определенную часть возмущений и снимает требование малости участков орбиты, на которые разбивается весь интервал. Предложенная модификация методики перемножения переходных матриц обеспечивает относительную точность вычисления изохронных производных для спутников GPS порядка 10^{-3} на интервале до 4 сут. По эффективности такая методика существенно превосходит все известные и для ее применения достаточно иметь лишь данные о траектории. Поэтому она может найти применение в задачах уточнения орбит в режиме реального времени.

Основные проблемы высокоточного прогнозирования орбит рассматриваемых спутников связаны с моделями двух возмущающих факторов:

1) приливов различного происхождения (для геодинамических спутников) и 2) эффектов, связанных с давлением солнечного света (для навигационных ИСЗ). Этим двум эффектам и было уделено основное внимание при разработке высокоточных алгоритмов моделирования движения указанных классов спутников.

1) Рекомендованная IERS модель океанических приливов GOT99-2B (Ray, 1999), которая получена по альтиметрическим измерениям, содержит разложения по сферическим гармоникам до 24 порядка и степени высот 23 приливных волн. Использование таких моделей в полном объеме при высокоточном моделировании движения геодинамических спутников вызывает серьезные трудности.

Задача оптимизации такой модели состоит в определении необходимого набора волн и коэффициентов их разложений для точного моделирования орбит конкретных спутников с заданной точностью. Был проведен анализ влияния океанических приливов на орбиты геодинамических спутников ЛАГЕОС и спутников GPS. С использованием аналитических выражений для возмущений в элементах оценивалось влияние различных гармоник в разложениях приливных волн и формировалась оптимизированная модель в соответствии с заданными критериями по точности и периодам. Было установлено, что разложений приливных волн по сферическим гармоникам до 10 порядка достаточно, чтобы в полной мере учесть влияние приливов на движение спутников ЛАГЕОС 1 и ЛАГЕОС 2. Коэффициенты разложений для долгопериодических приливов, которых нет в модели GOT99-2B, были взяты из модели EGM96S. Параметры последней согласованы с параметрами модели гравитационного поля EGM96. Кроме того, в общую модель были добавлены коэффициенты разложения атмосферного прилива S_{2A}, полученные по той же методике, которая применялась для модели GOT-992B. В результате поведенного анализа составлен набор волн из современных моделей океанических и атмосферных приливов и их разложений до степеней, необходимых для вычисления возмущений орбит спутников ЛАГЕОС с точностью не хуже 5 мм. Этот набор волн включает:

— 11 суточных ($Q_1, O_1, P_1, K_1, M_1, J_1, OO_1, \phi_1, \pi_1, \psi_1, \rho_1$);

— 7 полусуточных ($2N_2, K_2, L_2, M_2, N_2, S_2, T_2$);

— 1 полусуточную от атмосферы S_{2A};

— 4 долгопериодических: Sa, Ssa, Mm, Mf (из модели EGM96S).

В разложении каждой приливной волны сохранено определенное число сферических гармоник, в зависимости от их влияния на возмущения.

Максимальная степень гармоник при этом не превышает 8. Составленная модель океанических приливов объединяет достоинства спутниковой модели EGM96S, представляющей долгопериодические приливы, и альтиметрической модели GOT99-2B, более точно описывающей суточные и полусуточные приливы.

В последние годы большую актуальность приобрели задачи, связанные с определением временных вариаций и вековой эволюции коэффициентов низших гармоник, в которых отражаются различные геодинамические процессы. В этом ряду коэффициенты C_{21}, S_{21} вызывают особый интерес, так как они связаны с вековым движением полюса, эффектом полюсного прилива, а также с возможностью проверки определенных гипотез о взаимном вращении ядра и мантии (Wahr, 1987). Исходя из этого были исследованы влияние долгопериодических вариаций коэффициентов C_{21}, S_{21} на движение спутников и возможность уточнения их модели из обработки спутниковых наблюдений.

Аналитическим способом были получены возмущения, обусловленные долгопериодическим движением оси фигуры из-за полюсного прилива. Возмущения вдоль орбиты с суточным периодом составляют: для спутника СТАРЛЕТТ — 30 см, для спутников ЛАГЕОС — 6 - 8 см, для спутников GPS возмущения не превышают 1 см, а в случае геосинхронных спутников могут возникать резонансные эффекты до 100 м с периодами более 400 сут. По результатам проведенного анализа был сделан вывод, что уточнение модели полюсного прилива возможно по лазерным наблюдениям спутников ЛАГЕОС при точном моделировании всех короткопериодических возмущений. Этот результат послужил основой для обработки лазерных наблюдений спутников ЛАГЕОС с целью определения вариаций коэффициентов первой и второй степени геопотенциала.

2) Точность определения орбит навигационных спутников главным образом зависит от точности моделирования эффектов, обусловленных давлением солнечного излучения, что связано со сложной формой этих спутников и с особенностями их ориентации относительно Солнца. Использование стандартных моделей, разработанных в лабораторных условиях, могут приводить к ошибкам до 50 см на суточном интервале, что диктует необходимость разработки эмпирических моделей как дополнение к стандартным. При этом важна оптимальная структура модели для получения высокой точности прогнозирования орбит при минимальном числе параметров.

Для проведения численных экспериментов по анализу оптимальной структуры модели радиационного давления был разработан программный пакет, который одновременно является составной частью (орбитальный блок) пакета GRAPE (Гаязов, Кешин, Фоминов, 2000), предназначенного для обработки GPS-измерений глобальной сети пунктов. В режиме автономной работы орбитальный блок позволяет уточнять параметры орбиты, параметры светового давления и параметры вращения Земли из обработки так называемых псевдонаблюдений — точных эфемерид спутников, получаемых IGS путем комбинирования решений различных центров анализа данных и имеют точность порядка 5 см. Они отнесены к Земной системе координат (ITRF) и зависят от принятых значений параметров вращения Земли.

Проводилась обработка суточных серий таких данных с определением на каждом суточном интервале начальных параметров орбит, параметров моделей радиационного давления и параметров вращения Земли (координат полюса, их скоростей и LOD). Интегрирование уравнений движения спутников и вариационных уравнений для динамических параметров производилось с учетом того же набора возмущающих факторов, который принят за основу практически всеми центрами обработки IGS.

Для оценки оптимальности структуры модели использовались следующие критерии: точность представления эфемерид IGS, точность восстановления параметров вращения Земли, принятых при построении точных эфемерид IGS, устойчивый характер изменения параметров на длительном интервале, и минимальное число параметров. Последнее требование связано с тем, что из обработки суточных серий фазовых измерений уверенно могут быть определены лишь 2–3 параметра. Обработка большого объема псевдонаблюдений была выполнена для определения значимости параметров и характеристик их оценок.

Компоненты возмущающей силы в спутникоцентрической системе координат в полученной модели задаются выражениями:

$$X = C \sum_{k=0}^{3} X_{2k+1} \sin[(2k+1)(B+\Delta B)] + X_{2s} \sin 2(u-u_0),$$

$$Z = C \sum_{k=0}^{2} Z_{2k+1} \cos[(2k+1)(B+\Delta B)] + Z_{2c} \cos 2(u-u_0),$$

где B — угол "Земля-спутник-Солнце", X_{2k+1}, Z_{2k+1} — коэффициенты стандартных моделей, а $C, \Delta B, X_{2s}, Z_{2c}$ вместе с боковой силой Y_0 представляют собой эмпирические параметры.

Анализ многочисленных вариантов обработки псевдонаблюдений на интервале 1000 сут показал, что оптимальной является модель с четырьмя параметрами: $C, \Delta B, Y_0, X_{2s}$. Такая модель позволяет представить точные эфемериды GPS-спутников на суточных интервалах с ошибкой 1-3 см. Показано, что введение параметра ΔB в модель и определение его из наблюдений наряду с Y_0 позволяет учесть долговременные отклонения в режиме ориентации спутника.

Масштабный коэффициент C для всех спутников меняется периодически (в пределах 2 %) в зависимости от ориентации плоскости орбиты относительно Солнца. Изменения параметров хорошо аппроксимируются суммой двух тригонометрических членов с аргументами $2\beta_0$ и $4\beta_0$ (β — высота Солнца над орбитальной плоскостью). Изучение долговременных вариаций параметров позволило определить для каждого спутника средние значения параметров, которые можно использовать при обработке фазовых измерений на длительных интервалах. При этом по фазовым наблюдениям достаточно определять лишь масштабный коэффициент C и боковую силу Y_0. Таким образом, структуру модели можно считать оптимальной по таким характеристикам как точность, число параметров и пригодность для использования на больших интервалах времени.

Начиная с середины 2002 года, улучшенная модель светового давления используется в процессе регулярной обработки фазовых измерений GPS-спутников для определения ПВЗ и орбит с помощью программного пакета GRAPE. Попытка применения разработанной методики к спутникам ГЛОНАСС при обработке их лазерных наблюдений также оказалась успешной, что, объясняется близостью конструкций и режимов ориентации спутников двух систем.

Современные требования к точности обработки GPS-измерений приводят к необходимости учета достаточно малых эффектов, влияющих на орбиты спутников. Поэтому в развитие разработанной эмпирической модели светового давления были исследованы два дополнительных эффекта, связанных с особенностями прохождения спутника через тень Земли.

Первый из них обусловлен изменением режима теплового излучения спутника в зоне тени, а именно инерционностью эффекта Ярковского. Эффект Ярковского, который включен в стандартные модели в предположении постоянного освещения спутника Солнцем (Fliegel et al, 1992), сохраняется и в тени, убывая по мере остывания поверхности спутника, тогда как спутник уже не испытывает давления прямого солнечного излучения. И наоборот, примерно за такое же время (около часа) после выхода из тени поверхность спутника нагревается до температуры равновесия. Таким образом, для давления теплового излучения должна быть использована функция тени, которая учитывает экспоненциальный закон остывания и нагревания поверхностей спутника и имеет совершенно иной вид, чем функция тени для прямого светового давления.

Моделируя соответствующее ускорение с учетом данных об изменении разности температур освещенной и неосвещенной поверхностей спутника, путем численного интегрирования уравнений движения спутника были получены оценки влияния данного эффекта на элементы орбиты. Скачкообразные возмущения главным образом возникают в большой полуоси и эксцентриситете орбиты в периоды, когда спутник проходит через тень. Эффект за сутки достигает 3–4 см. Возмущения в элементах ориентации орбиты на порядок меньше. Разработанная методика может быть использована для учета этого эффекта при обработке наблюдений.

Второй эффект, связанный с изменениями номинального режима ориентации спутника при выходе из тени Земли, вносит намного более значительную ошибку. При длительных погружениях спутника в тень Земли возникают отклонения в режиме его ориентации относительно Солнца, которые устраняются в процессе послетеневых маневров (Bar-Sever, 1995). Таким образом, после выхода из тени спутник получает дополнительный импульс.

Разработана методика определения из наблюдений дополнительных ускорений GPS-спутников, возникающих от светового давления вследствие нарушения номинального режима ориентации при выходе из тени Земли. При моделировании этого эффекта можно считать, что компоненты дополнительного импульса пропорциональны некоторой функции, которая в момент выхода спутника из тени Земли совпадает с функцией тени, а далее убывает по мере восстановления номинальной ориентации спутника. При этом используется информация о средней длительности послетеневого маневра. Применение такой методики при обработке псевдонаблюдений позволяет в несколько раз уменьшить ошибки моделирования орбит спутников, испытывающих нарушения режима ориентации при прохождении тени. Компоненты такого импульса могут быть представлены и как функции малых углов - отклонений углов ориентации спутника от номинальных значений. Однако вычисления показывают, что отклонения в углах ориентации определяются с большими ошибками даже по псевдонаблюдениям, и из обработки фазовых измерений могут быть определены только компоненты импульса.

Четвертая глава “Результаты обработки лазерных наблюдений геодинамических ИСЗ”.

Проведенный в начале данной главы анализ, а также результаты других авторов показывают, что применение лазерных наблюдений для независимого и высокоточного определения ПВЗ с суточным разрешением возможно только при выполнении ряда условий, среди которых: а) проведение дневных наблюдений на большинстве станций, б) значительное повышение приоритетов спутников ЛАГЕОС в программах наблюдений, и в) использование дополнительных спутников с характеристиками, близкими к данным спутников ЛАГЕОС. Поэтому, уникальность лазерных наблюдений геодинамических ИСЗ, сочетающая в себе высокую точность, длительную историю, а также чувствительность орбит спутников к гравитационным эффектам делает их наиболее подходящим средством в изучении долговременных вариаций гравитационного поля Земли и связанных с ними геодинамических процессов. Основные результаты, представленные в этой главе, относятся именно к этому направлению исследований.

Обработка данных лазерных наблюдений спутников ЛАГЕОС 1 и ЛАГЕОС 2 была выполнена с целью совместного определения коэффициентов первой и второй степеней геопотенциала и дальнейшего анализа вариаций этих коэффициентов.

В орбитальных вычислениях учитывались коэффициенты гравитационного поля до 20 порядка и степени из модели EGM96 и параметры модели твердотельных приливов, рекомендованной IERS. Для океанических приливов использовалась комбинированная и оптимизированная модель, описанная в главе 3. Параметры вращения Земли были взяты из ряда C04 IERS. В вычислениях использовались фиксированные координаты и скорости станций наблюдения в системе ITRF2000.

В обработку включены лазерные наблюдения спутников ЛАГЕОС 1 и ЛАГЕОС 2 на интервале более 9 лет с MJD 49500 (1994.4) по MJD 52800 (2003.5). Обработка лазерных наблюдений проводилась на 10-суточных орбитальных дугах, на которых определялись следующие параметры:

— начальные параметры орбит спутников (координаты и скорости);

— ускорения вдоль орбит спутников C_T;

— 6 гармонических коэффициентов: $\bar{C}_{10}, \bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}, \bar{C}_{20}, \bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$.

При этом определялись поправки к нулевым априорным значениям коэффициентов первой степени, характеризующих положение геоцентра, и к коэффициентам второй степени $\bar{C}_{20}, \bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$, которые моделировались с учетом их линейных трендов и приливных вариаций в соответствии с рекомендациями Соглашений IERS. На каждой орбитальной дуге обрабатывались от 1500 до 5000 наблюдений, которые представлялись со среднеквадратическими ошибками от 2 до 6 см. Анализ коэффициентов корреляции показал, что поправки к геодинамическим параметрам очень слабо коррелируют как между собой, так и с поправками к спутниковым параметрам. Определяемые эмпирические ускорения, которые можно рассматривать как своеобразный индикатор качества решений на отдельных дугах, для обоих спутников имеют долговременную устойчивость. Их средние значения равны: $-2.5 \cdot 10^{-12}$ м/с^2 для спутника ЛАГЕОС 1 и $-2.1 \cdot 10^{-12}$ м/с^2 для ЛАГЕОС 2.

Высокочастотные вариации полученных поправок к гармоническим коэффициентам могут отражать влияние атмосферы, океана (включая ошибки моделей приливов), а также ошибки наблюдений и метода определения. Однако большой интерес представляет анализ их низкочастотных вариаций с целью выявления геофизических сигналов.

<u>Коэффициенты $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$</u>. Хотя спектры амплитуд полученных поправок к этим коэффициентам не показывают доминирующих пиков в области чандлеровского периода, был проведен их анализ с целью оценки точности рекомендованного в Соглашениях IERS и использованного при обработке наблюдений значения числа Лява для полюсного прилива $k_2 = 0.3077$. Была составлена следующая система уравнений:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{21}(t_i) &= -K[x_p(t_i) - \bar{x}_p(t_i)]\Delta k_2, \\ \Delta\bar{S}_{21}(t_i) &= K[y_p(t_i) - \bar{y}_p(t_i)]\Delta k_2, \end{aligned}$$

где $K = \sqrt{3}\bar{C}_{20}/k_s = 4.33 \cdot 10^{-9}$, координаты текущего и среднего полюса в секундах дуги. Из решения этой системы получена поправка:

$$\Delta k_2 = 0.026 \pm 0.011,$$

которая близка к теоретическому значению поправки за вклад океана на чандлеровской частоте $\Delta k_2^o = 0.044$. Это дает основание заключить, что в Соглашениях IERS в число Лява для полюсного прилива, не была введена поправка за влияние океана.

Найденные путем осреднения результатов на 9-летнем интервале коэффициенты $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$ для эпохи 2000.0 и скорости их изменения были преобразованы в координаты средней оси фигуры с их линейными трендами:

$$\begin{aligned} \bar{x}_f(t) &= 0''.064 + 0''.00251(t - 2000.0), \\ \bar{y}_f(t) &= 0''.357 + 0''.00283(t - 2000.0). \end{aligned}$$

Сравнение их с координатами средней оси вращения Земли за столетие по данным IERS показывает, что полученные линейные тренды для обеих координат средней оси фигуры очень хорошо согласуются со скоростями векового движения среднего полюса вращения.

До недавнего времени предполагалось, что средняя ось вращения и средняя ось фигуры совпадают. Однако, следует иметь в виду, что наблюдаемые значения коэффициентов $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$ определяют положение оси фигуры всей Земли, а наблюдаемая ось вращения относится только к мантии. Отсюда, сравнение взаимной ориентации средней оси вращения и средней оси фигуры может дать информацию о вращении ядра относительно мантии. Таким образом, появляется реальная возможность применения идеи, высказанной Дж. Варом (Wahr, 1987), что вариации коэффициентов $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$ могут быть использованы для проверки различных гипотез о вращении ядра.

В теории вращения трехслойной Земли с внешним жидким и внутренним твердым ядром (Mathews et al, 1991), изменения тензора инерции Земли определяются с учетом как деформаций, так и вращения внутреннего ядра относительно мантии. Зависимость между вариациями коэффициентов $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$ и компонентами экваториального вращения внутреннего ядра n_1, n_2 может быть записана в следующем упрощенном виде:

$$(\Delta\bar{C}_{21} - i\Delta\bar{S}_{21}) = \alpha(n_1 + in_2),$$

где коэффициент α находится в пределах $2.4 \cdot 10^{-8} \div 3.4 \cdot 10^{-8}$ для моделей Земли PREM и 1066A соответственно.

Анализ полученных из обработки наблюдений поправок к значениям $\bar{C}_{21}, \bar{S}_{21}$, моделированным с использованием координат среднего полюса, показывает, что средняя ось фигуры Земли очень близка к средней оси вращения. Взаимные отклонения этих осей находятся на уровне 10-15 мс дуги. С ними согласуется и обнаруженная в коэффициенте $\bar{C}_{21}$ амплитуда долгопериодических вариаций, равная $0.4 \cdot 10^{-10}$. Все эти величины из приведенного выше соотношения приводят к амплитудам n_1, n_2 от $0\overset{\circ}{.}07$ до $0\overset{\circ}{.}1$ в зависимости от принятой модели Земли. Это опровергает гипотезы, по которым ось фигуры внутреннего ядра может отклоняться от оси фигуры мантии на величину более 1°.

Что касается обнаруженного периода вариаций коэффициента $\bar{C}_{21}$, равного 1160 сут, то он почти в 2 раза меньше периода свободного качания внутреннего ядра, предсказываемого указанной выше теорией. Для модели PREM этот период равен 2400 сут, а для 1066A – 1840 сут. Оказалось, что период в 1160 сут может иметь место лишь при таких параметрах Земли, когда передача момента от мантии к ядру осуществляется в основном за счет сил гравитации, а роль других механизмов (давления, топографии, электромагнитного взаимодействия) незначительна. Поэтому нельзя уверенно связывать этот период с эффектом вращения внутреннего ядра, тем более он четко просматривается только в коэффициенте $\bar{C}_{21}$. В то же время, результат показывающий малость углов отклонений средней оси фигуры Земли от средней оси вращения мантии сам по себе является значимым, так как ограничивает пределы возможных экваториальных вращений внутреннего ядра Земли на уровне $0\overset{\circ}{.}1$.

Коэффициенты $\bar{C}_{10}, \bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}$. Полученные на 10-суточных орбитальных дугах значения коэффициентов $\bar{C}_{11}, \bar{S}_{11}, \bar{C}_{10}$ были переведены в компоненты T_x, T_y, T_z геоцентра в системе координат станций наблюдения. Наличие вариаций с годовым периодом у всех компонент явно показывали соответствующие спектры амплитуд.

Из анализа полученных рядов были определены коэффициенты аппроксимирующих выражений следующего вида:

$$s(t) = A_0 + A_0' t + A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) + A_{1/2} \cos(\omega_{1/2} t + \phi_{1/2}),$$

где $A_1, A_{1/2}$ и $\phi_1, \phi_{1/2}$ — амплитуды и фазы годовой и полугодовой волн соответственно, а нулевые значения фаз соответствуют 1 января.

Полученные значения амплитуд и фаз годовых и полугодовых волн даны в табл. 2.

Таблица 2. Амплитуды и фазы сезонных вариаций геоцентра

Компонента	Годовая		Полугодовая	
	A_1 мм	ϕ_1 град.	$A_{1/2}$ мм	$\phi_{1/2}$ град.
T_x	2.5 ± 0.4	324 ± 12	0.5 ± 0.4	114 ± 46
T_x	2.8 ± 0.5	23 ± 12	0.3 ± 0.5	339 ± 103
T_x	6.7 ± 1.4	10 ± 13	1.6 ± 1.4	267 ± 54

Амплитуды и фазы вариаций геоцентра с годовым периодом находятся в достаточно хорошем согласии с результатами определения других групп анализа, участвовавших в соответствующем международном проекте (Boucher, Sillard, 1999). Они наиболее близки к результатам центра обработки Техасского университета, полученным также из обработки лазерных наблюдений спутников ЛАГЕОС ($A_{1,T_x} = 2.1$ мм, $A_{1,T_y} = 3.2$ мм,

$A_{1,T_z} = 2.9$ мм). Что касается полугодовых волн, для них мы получили существенно меньшие значения амплитуд, чем у других групп. В особенности это относится к компонентам T_x, T_y, для которых полученные нами амплитуды в 5–10 раз меньше, чем в определениях геометрическим методом (DORIS, GPS) и в 1.5–2 раза — в определениях динамическим методом.

Коэффициент $\bar{C}_{20}$. Анализ результатов определения вариаций коэффициента геопотенциала $\bar{C}_{20}$ проводился по следующей схеме. Из полученных поправок к линейной модели $\bar{C}_{20}$ сначала был исключен эффект лунного океанического прилива с периодом 18.6 лет, которого нет ни в одной модели океанических приливов. При использовании амплитуды равновесного прилива 1.22 см он приводит к изменениям $\bar{C}_{20}$ с амплитудой $0.9 \cdot 10^{-10}$. Далее была определена амплитуда сезонных вариаций $\bar{C}_{20}$ с годовым периодом, которая оказалась равной $1.3 \cdot 10^{-10}$. После исключения всех этих вариаций поправки $\Delta\bar{C}_{20}$ были переведены в поправки к ненормированному коэффициенту J_2 для фиксированной фундаментальной эпохи 2000.0 (рис. 1).

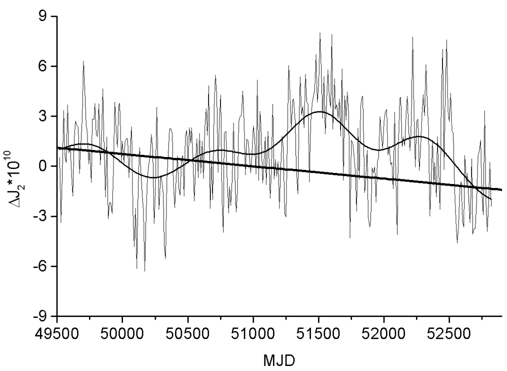

Рис. 1: Вариации поправок к J_2 для эпохи 2000.0 после исключения годовой волны.

Полученные результаты явно показывают значительное замедление скорости уменьшения коэффициента динамического сжатия Земли, произошедшее после 1998 года. Эта аномалия, обнаруженная также в работе (Cox et al, 2003), объясняется явлением Эль-Ниньо, которое вызывает повышение температуры в южных областях Тихого океана.

Пятая глава содержит краткое изложение выбранной методики обработки фазовых измерений GPS-спутников, общие характеристики программного пакета GRAPE, результаты обработки GPS-измерений глобальной сети IGS и анализ точности результатов.

Сложность обработки фазовых измерений навигационных спутников обусловлена особенностями этих измерений. Выбор методики обработки зависит от постановки задачи и имеющихся ресурсов. С учетом приоритетов решаемых задач (определение ПВЗ, координат станций, орбит спутников по измерениям глобальной сети), а также результатов сравнительного анализа различных методик в качестве основной в программном пакете GRAPE была выбрана методика обработки тройных разностей фаз.

Тройные разности фаз формируются по измерениям фазы Φ_A^i пары пунктов (A, B) и пары спутников (i, j) для двух моментов времени t_1, t_2 и могут быть записаны в виде:

$$\Phi_{AB}^{ij}(t_1;t_2) = \frac{\nu}{c}(\rho_{AB}^{ij}(t_2) - \rho_{AB}^{ij}(t_1)) - \frac{\nu}{c}(\Delta\rho_{AB}^{ij}(t_2) - \Delta\rho_{AB}^{ij}(t_1)).$$

Здесь величины $*_{AB}^{ij}$ получены с применением правила $*_{AB}^{ij} = *_B^j - *_A^j - *_B^i + *_A^i$, ν – частота сигнала, c – скорость света, ρ_A^i – расстояние между положением спутника i в момент излучения сигнала и положением приемника A в момент приема сигнала (измерения фазы Φ_A^i), $\Delta\rho_A^i$ – поправка к дальности за влияние тропосферы.

Для исключения ионосферы используется линейная комбинация измерений на двух несущих частотах L1 (ν_1) и L2 (ν_2):

$$\Phi(\chi) = \Phi(\nu_1) - \frac{\nu_2}{\nu_1}\Phi(\nu_2).$$

Что касается тропосферы, то ее “сухая” компонента вычисляется, а из наблюдений определяется “влажная” компонента тропосферной задержки в зените, которая на суточном интервале аппроксимируется интерполяционным полиномом. Из остальных редукционных поправок весьма важной является поправка за аберрационное время, которое вводится для того, чтобы топоцентрическую дальность ρ можно было определять по положениям спутника и приемника в один и тот же момент (приема сигнала).

Главным достоинством тройных разностей является то, что они не содержат не только ошибок часов спутников и станций, но также и неоднозначностей фазы, разрешение которых сопряжено со значительными трудностями. Все это приводит к существенному уменьшению числа определяемых параметров. Остаются именно те параметры, которые представляют интерес при решении задач геодинамики: ПВЗ, координаты станций, параметры орбит и параметры тропосферы.

Недостаток тройных разностей заключается в их значительной коррелированности, связанной со способом их формирования. Это вызывает необходимость построения ковариационной матрицы измерений внушительного размера и ее обращения в процессе решения системы параметрических уравнений. Однако, для случая тройных разностей ковариационная матрица является блочно - трехдиагональной, что существенно облегчает задачу декорреляции.

Поскольку формирование системы нормальных уравнений с учетом недиагональной ковариационной матрицы для тройных разностей занимает основную часть времени обработки измерений, применяется методика образования нормальных точек. Нормальные точки с интервалом в 3.5 мин образуются для двойных разностей фаз, которые далее используются для формирования тройных разностей. Кроме предварительной фильтрации случайных ошибок это способствует существенному сокращению времени обработки за счет уменьшения числа моделируемых измерений (Кешин, 2001). Таким образом, при обработке измерений глобальных сетей для определения в основном ПВЗ и орбит использование тройных разностей оказывается весьма эффективным. В табл. 3 приведены основные характеристики режима обработки тройных разностей фаз в программном пакете GRAPE. Именно в этом режиме проводилась массовая и регулярная обработка фазовых измерений глобальной сети.

Таблица 3. Режим обработки измерений глобальных сетей.

Моделируемые измерения	тройные разности (свободная от ионосферы линейная комбинация)
Длины баз	500–5000 км
Мин. угол возвышения	10°
Шаг измерений	3.5 мин (нормальные места)
Интервал формирования тройных разностей	14 мин
Параметры:	– ПВЗ ($X_p, \dot{X}_p, Y_p, \dot{Y}_p, LOD$) – орбиты спутников – параметры тропосферной задержки – параметры модели светового давления – координаты станций

При обработке наблюдений глобальной сети особенно важна адекватность используемой динамической модели спутников. Поэтому блок орбитальных вычислений тестировался в автономном режиме в ходе обработки серий так называемых псевдонаблюдений — точных эфемерид спутников GPS, получаемых международной службой IGS.

Регулярная обработка фазовых измерений GPS-спутников с помощью программного пакета GRAPE была начата в 2000 году. Обрабатываются суточные серии фазовых измерений опорных пунктов глобальной сети IGS с определением параметров вращения Земли, орбит спутников, и параметров тропосферной задержки для станций. Число станций в различных сериях измерений колеблется от 30 до 45, куда входят также 7 российских пунктов: ARTU, IRKT, MAG0, SVTL, TIXI, ZECK, ZWEN. Длины баз, выбираемых из условия их линейной независимости, составляют от 500 до 5000 км. Верхняя граница длин баз определяется исходя из необходимости минимизации потерь измерений на этапе формирования тройных разностей.

По каждой суточной серии измерений определяются 600–700 параметров, в том числе:

– параметры вращения Земли ($x_p, \dot{x}_p, y_p, \dot{y}_p, LOD$);

– параметры орбит спутников (координаты и скорости на начальный момент суточной дуги, 2 параметра модели светового давления);

– параметры тропосферной задержки сигнала (9 – 12 постоянных за сутки для каждого пункта).

Начиная с середины 2002 года определение параметров вращения Земли выполняется в полуоперативном режиме с задержкой на 2 дня. С этого же момента результаты начали поставляться в IERS для участия в формировании сводного решения для ПВЗ. Результаты доступны также на Web-сайте службы ПВЗ ИПА РАН по адресу:

http://www.ipa.nw.ru/PAGE/DEPFUND/GEO/eop_serv/eopservr.htm (Малкин, 2005).

Оценка точности результатов проводилась на основе сравнения с окончательными данными NEOS и IERS. В табл. 4 приведены средние значения разностей ПВЗ и среднеквадратические значения остаточных уклонений при сравнении с данными IERS для 2003 года. Здесь следует отметить, что эти результаты были получены в указанном выше полуоперативном режиме и после появления новых наблюдений не перевычислялись (за исключением отдельно взятых серий).

Таблица 4. Оценка точности результатов ПВЗ
из сравнения с данными IERS.

Параметр	Средние значения разностей	RMS остаточных разностей
X_p (mas)	-0.136	0.167
Y_p (mas)	0.238	0.148
LOD (0.1ms)	-0.247	0.376

Оценка точности координат полюса и длительности суток по данным Бюллетеней B IERS представлена на рис. 2. Анализ показывает, что ухудшение точности ПВЗ в отдельные периоды связаны в основном с изменениями в конфигурации сети.

Оценка точности получаемых орбит спутников GPS производилась путем сравнения с окончательными орбитами IGS. Среднеквадратические значения отклонений по трем координатам (3D RMS) и по всем спутникам для суточных дуг находится в пределах от 8 до 15 см. Для интервала 51950 – 53310 MJD они представлены на рис. 3. Существенное повышение точности орбит после даты 52400 MJD (май 2002 года) связано с переходом к использованию эмпирической модели светового давления улучшенной структуры.

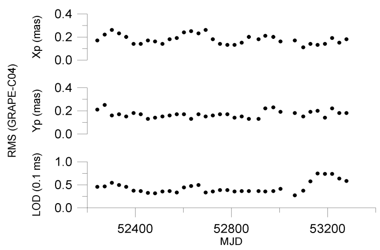

Рис. 2: Точность результатов определения ПВЗ по данным бюллетеней B IERS.

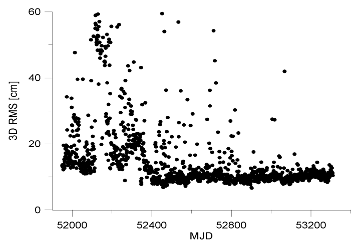

Рис. 3: 3D RMS отклонений орбит спутников от точных эфемерид IGS.

Сравнение параметров зенитной тропосферной задержки с данными других центров анализа показывает, что среднеквадратические отклонения параметров задержки на суточном интервале находятся в пределах 5 –15 мм. Характерно, что параметры тропосферы являются наиболее коррелированными среди всех параметров, определяемых в режиме тройных разностей. Например, коэффициенты корреляции, больше чем 0.85, в основном относятся к параметрам тропосферы.

Общий итог исследований в этом направлении сводится к тому, что методика обработки тройных разностей фаз, несмотря на довольно жесткие требования к составу измерений, может быть успешно применена для определения ПВЗ и орбит навигационных спутников по измерениям глобальной сети. Ее применение обеспечивает точность определения ПВЗ на уровне 0.15 mas для координат полюса и 0.35 ms для LOD, а точность орбит спутников на уровне 10 см, что близко к точности мировых центров анализа GPS-данных.

Поскольку при обработке тройных разностей требуемые ресурсы значительно ниже, одним из путей повышения точности может оказаться увеличение числа станций, включаемых в обработку, до 70–100. То же самое относится к значительному увеличению числа спутников в перспективе совместного использования наблюдений GPS, ГЛОНАСС и GALILEO. Именно в этом направлении могут проявиться преимущества метода обработки тройных разностей.

Были проведены экспериментальные вычисления также с применением методики обработки безразностных фазовых измерений, реализованной в рамках пакета GRAPE (Keshin, 2002) на основе фильтра SRIF (Square Root Information Filter) (Bierman, 1977). Результаты этих вычислений показали несколько бо́льшую точность определения ПВЗ, параметров орбит и параметров тропосферы, чем при определении по тройным разностям, несмотря на использование наблюдений существенно меньшего числа станций (10–15 станций вместо 30–35). В случае разрешения всех фазовых неоднозначностей также достигается высокая точность определения поправок часов. Среднеквадратические отклонения поправок часов от окончательных данных IGS составляют менее наносекунды. Это открывает возможность использования этой версии программы также для синхронизации шкал времени пунктов, удаленных на расстояния до нескольких тысяч км.

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

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Гаязов И.С., 1977. Программа определения орбит ИСЗ по фотографическим и лазерным наблюдениям. – Алгоритмы небесной механики, ИТА АН СССР, Вып. 16, 3–33.
2. Гаязов И.С., 1977. Определение геоцентрических координат станции Кергелен динамическим методом. – Научные информации Астросовета АН СССР, Вып.35, 20–22.
3. Гаязов И.С., 1978. Улучшение элементов орбит ИСЗ по фотографическим и лазерным наблюдениям. – Бюлл. ИТА, Т. 14, N 6, 356–363.
4. Гаязов И.С., 1978. Об определении геоцентрических координат станций наблюдения ИСЗ. – В Сб.: Астрометрия и небесная механика ЛО ВАГО, 471–474.
5. Гаязов И.С., 1982. Комплекс программ орбитального анализа наблюдений ИСЗ. – Наблюдения ИСЗ, N 20, 314–319.
6. Гаязов И.С., 1982. Использование модели геопотенциала в орбитальном методе определения координат станций. – Бюлл. ИТА, Т. 15, N 4, 200–204.
7. Гаязов И.С., 1982. Определение геоцентрического смещения земной системы координат, реализованной методами спутниковой геодезии. – В кн.: Изучение Земли как планеты методами астрономии, геодезии и геофизики, Киев, 200–204.
8. Гаязов И.С., 1984. Обработка наблюдений спутника ЛАГЕОС с использованием аналитической теории. – Наблюдения ИСЗ, Вып. 21, ч.1, 38–41.
9. Гаязов И.С., 1984. Опыт сравнения аналитического и численного методов учета некоторых возмущений в движении ИСЗ. – В кн.: Всесоюзная конференция “Исследование гравитационного поля Земли космическими средствами”, Тезисы докладов, Львов, 14.
10. Гаязов И.С., 1984. О точности аналитической теории движения геодезических ИСЗ. – В кн.: ИНТЕРКОСМОС – секция N 6, Абстракты, Прага, 35.
11. Сочилина А.С., Гаязов И.С., 1984. Об одном способе вычисления возмущений в движении спутника от лунных неравенств. – Бюлл. ИТА, Т. 15, N 5, 284–287.

12. Гаязов И.С., Сочилина А.С., 1985. О выборе системы координат при исследовании движения высоких спутников. – Бюлл. ИТА, Т. 15, N 9, 481–485.

13. Гаязов И.С., 1991. О влиянии деформаций Земли из-за вращения на движение ИСЗ. – В кн.: Международный симпозиум “Etalon Satellites Laser Data Analysis”, Тезисы докладов, Москва, 31.

14. Гаязов И.С., 1991. О влиянии вариаций коэффициентов C_{21}, S_{21} геопотенциала на движение ИСЗ. – Препр. ИТА РАН, N 13, 1–16.

15. Бахтигараев Н.С., Гаязов И.С., Пирогов К.В., Сочилина А.С., 1994. О создании долгосрочной эфемеридной службы геостационарных спутников. – Наблюдения ИНТ, 88, 31–36.

16. Fominov A.M., Gayazov I.S. Sokolsky A.G., 1994. Elaboration of the Program Package for processing the high precision satellite observations. – In: Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies (Proc. of the Conf. on Astrometry and Celestial Mechanics, Poznan, Poland 1993), 389–393.

17. Gayazov I.S., 1994. On using satellite results for C(2,1) and S(2,1) gravity coefficients to the Earth's core rotation problem. Abstract. – In: Annales Geophysicae, 1994, Supplement I to V. 13, Part I, 173.

18. Беленко В.И., Гаязов И.С., Епихина Г.И., Кауфман М.Б., 1996. Оперативная обработка наблюдений ИСЗ ЛАГЕОС в Российской государственной службе ПВЗ. – В кн.: Международная конференция “Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики”, Тезисы докладов, СПб, 89–90.

19. Гаязов И.С., 1998. О вычислении матрицы Якоби при уточнении орбит спутников GPS. – Труды ИПА РАН, Вып. 3, 225–241.

20. Abalakin V.K., Abramov D.A., Bogdanov V.I., BoulangerYu.D., Gajazov I.S., Golubev V.M., Gorshkov V.L., Iljakov V.Y., Kakkuri J., Komarotsin A.A., Kumkova I.I., Kuprianov A.O., Lebedev K.K., Malikov P.P., Malkin Z.M., Medvedev M.Yu., Mikerov V.I., Naumov V.A., Neronov N.N., Popov A.A., Poutanen M., Prilepin M.T., Prudnikova E.Ja., Ratikov I.V., Romm G.M., Shustova L.E., Sjutkin V.V., Solodov V.A., Talizin V.I., Taybatorov K.A., Troshkov G.A., Trubitsina A.A., Ustinov V.Y., Vermeer M., 1998. Russian participation in 1997 GPS Campaign of the International Baltic Sea Level Project. – Proc. 3rd Intern. Conf. on Problems of Physical Metrology "FIZMET-98", St.Petersburg, 26–29.

21. Гаязов И.С., 2000. Эмпирические модели радиационного давления для спутников GPS и ГЛОНАСС. – Труды ИПА РАН, Вып. 5, 93–102.

22. Gayazov I.S., Keshin M.O., Fominov A.M., 2000. GRAPE software for GPS data processing: first results of ERP determination. – In: Proc. IGS Network Workshop, Oslo, Norway. Extended abstracts.

23. Гаязов И.С., Кешин М.О., Фоминов А.М., 2001. Программный пакет GRAPE и его использование для экспериментальных определений ПВЗ. – Труды ИПА РАН, Вып. 6, 291–299.

24. Gayazov I.S., 2002. Parameterization of the Solar Radiation Pressure model for GPS satellites. – Труды ИПА РАН, Вып.8, 77-78.

25. Гаязов И.С., 2004. Параметризация эмпирической модели светового давления для спутников GPS. – Труды ИПА РАН, Вып. 11, 59–77.

26. Gayazov I.S., 2004. Variations of C21, S21 geopotential coefficients from SLR data of Lageos satellites. – In: Astrometry, Geodynamics and Solar System Dynamics: from milliarcseconds to microarcseconds, St. Petersburg, 193–198.

27. Гаязов И.С., 2005. О параметризации эмпирической модели светового давления для спутников GPS. – Известия вузов (геодезия и аэрофотосъемка), N 2, 68–84.

28. Гаязов И.С., 2005. Моделирование эффектов светового давления при определении точных орбит навигационных спутников. – В кн.: Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временнóе обеспечение (КВО-2005)", Тезисы докладов, СПб., 199–200.

29. Гаязов И.С., 2005. Определение вариаций положения оси фигуры Земли и геоцентра по лазерным наблюдениям спутников ЛАГЕОС. – В кн.: Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временнóе обеспечение (КВО-2005)", Тезисы докладов, СПб., 121–122.

30. Гаязов И.С., Панафидина Н.А., Малкин З.М., 2005. Обработка GPS-наблюдений в ИПА РАН. – В кн.: Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временнóе обеспечение (КВО-2005)", Тезисы докладов, СПб., 101–102.

31. Гаязов И.С., 2005. Вариации положения оси фигуры Земли и геоцентра из обработки лазерных наблюдений спутников ЛАГЕОС. – Известия вузов (геодезия и аэрофотосъемка), N 3, 52–68.

Цитируемая литература

Беликов М.В., 1990. Метод численного интегрирования с чебышевской аппроксимацией для решения задач эфемеридной астрономии. – Препринт ИТА АН СССР, N 4.

Кешин М.О., 2001. Обработка фазовых измерений глобальных сетей станций при помощи пакета GRAPE. Методика и результаты. Труды ИПА РАН, Вып. 6, 271–290.

Малкин З.М., 2005. Web-сайт службы ПВЗ ИПА РАН. – Всероссийская конференция "Фундаментальное и прикладное координатно-временное обеспечение (КВО-2005)". Тезисы докладов, СПб., 231–232.

Aksnes K., 1970. A second-order artificial satellite theory based on an intermediary orbit. – Astron. J., V. 75, N. 9, 1066-1076.

Bar-Sever Y.E., 1995. A new model for GPS yaw attitude. Special Topics and New Directions (Workshop Proc., Potsdam), 128–140.

Bierman G.J., 1977. Factorization Methods for Discrete Sequential Estimation. Academic Press, NY.

Boucher C., Sillard P., 1999. Synthesis of submitted geocenter time series. – IERS Technical Note 25, 15–21.

Cok D.R., 1977. On the perturbations of a close Earth satellite due to lunar inequalities. – Celest. Mech., V. 16, N 4, 459–479.

Cox C.M., Au A., Boy J.-P., Chao B.F., 2003. Time-Variable Gravity: Using Satellite Laser Ranging as a Tool for Observing Long-Term Changes in the Earth Sysytem. – Proc. of 13th International Workshop on Laser Ranging, 13–23.

EIGEN-GRACE, 2003. EIGEN Gravity Field Model based on GRACE. Internet *http://www.gfz-potsdam.de/grace/*.

GGM01-GRACE, 2003. GRACE Gravity Model GGM01. Internet *http://www.csr.utexas.edu/grace/*.

Fliegel H.F., Gallini T.E., Swift E.R., 1992. Global Positioning System Radiation Force Model for Geodetic Applications. – Journ. Geoph. Res. V. 97. N B1, 559–568.

Kaula W.M., 1966. Theory of Satellite Geodesy, Blaisdell Publ. Co. Waltham, Toronto, London. (Русский перевод: Каула У. Спутниковая геодезия, Москва, 1970).

Keshin M.O., 2002. First results of GPS orbit determination with GRAPE package using a square root information filter. Труды ИПА РАН, Вып. 8, 96–97.

Lemoine F.G. Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R., 1998. The Development of the Joint NASA GSFC and National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96. – NASA/TP-1998-206861, GSFC.

Mathews P.M., Buffett B.A., Herring T.A., Shapiro I.I., 1991. Forced Nutations of the Earth: Influence of Inner Core Dynamics. 1. Theory. – J. Geophys. Res., V. 96, 8219–8242.

McCarthy D.D. (ed.), 2004. IERS Conventions 2003. – IERS Technical Note 32, Observatoire de Paris, Paris.

Ray R.D., 1999. A global ocean tide model from Topex/Poseidon altimetry: GOT99.2, NASA Tech. Memo. 209478, GSFC.

Wahr J.M., 1987. The Earth's C_{21} and S_{21} gravity coeficients and the rotation of the core. – Geophys. J. R. Astr. Soc., V. 88, 265–276.

Подписано к печати 8.08.2005. Формат $60 \times 90/16$. Офсетная печать.
Печ. л. 2.0. Уч.-изд. л. 2.0. Тираж 150 Заказ бесплатно

Отпечатано в ООО “Типография N 3”
(Санкт-Петербург, Литейный пр., 55).

ИПА РАН, 191187 С.-Петербург, наб. Кутузова, д. 10