ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ АСТРОНОМИИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

ПЕТРОВ
Леонид Юрьевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СО СВЕРХДЛИННЫМИ БАЗАМИ

Специальность 01.03.01
(Астрометрия и небесная механика)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург
1995

Работа выполнена в Институте прикладной астрономии Российской Академии наук.

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук В.С. Губанов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук Г.А. Красинский

кандидат физико-математических наук В.В. Витязев

Ведущая организация: Институт теоретической астрономии Российской Академии наук.

Защита состоится " " 1995 года в часов минут на заседании Диссертационного совета Д-200.06.01 по присуждению учёной степени кандидата физико-математических наук при Институте прикладной астрономии Российской Академии наук по адресу: 197042, Санкт-Петербург, Ждановская ул., д. 8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПА РАН.

Автореферат разослан " " 1995 года.

Учёный секретарь Диссертационного совета
Доктор физико-математических наук А.Т. Байкова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Настоящая диссертация посвящена развитию методов обработки радиоинтерферометрических наблюдений внегалактических источников с целью построения земной системы координат и нахождения поля скоростей станций, построения небесной системы координат, определения параметров вращения Земли, чисел Лява. На основе разработанных алгоритмов создан комплекс программ ВОРИН. Программы отлажены и, начиная со 2-го квартала 1994 года, используются в Институте прикладной астрономии РАН для обработки геодезических РСДБ наблюдений. С помощью этих программ обработаны длительные ряды наблюдений и получены результаты, часть из которых являются новыми.

Актуальность темы. На сегодняшний день метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) является самым точным методом астрометрии и способен решать широкий класс как прикладных, так и фундаментальных задач. С помощью РСДБ измерений можно построить абсолютным методом опорную земную систему координат и найти поле скоростей станций, построить квазиинерциальную небесную систему координат, вывести параметры вращения Земли (ПВЗ), определить числа Лява, уточнить параметр постньютоновского формализма γ. В связи с созданием в России в рамках проекта КВАЗАР-КВО сети радиотелескопов, работающих в режиме РСДБ, приобретает важное значение развитие алгоритмов обработки этих наблюдений, которые позволили бы реализовать весь потенциал радиоинтерферометрии, и разработка на их основе программного обеспечения проводимых и планируемых в ближайшем будущем экспериментов. Разработка собственного, независимого пакета анализа РСДБ наблюдений даёт возможность самостоятельно обрабатывать наблюдения, уточнять и дополнять модели обработки, сравнивать и критически оценивать результаты, полученные другими авторами.

Целью диссертационной работы является: 1) разработка и исследование алгоритмов и программ анализа радиоинтерферометрических наблюдений в целях построения земной и небесной систем координат, определения ПВЗ и чисел Лява; 2) создание программной среды, которая позволяла бы легко реализовывать и исследовать новые методы обработки РСДБ наблюдений, а также решать новые задачи.

Научная новизна работы заключается в следующем:

— Создана самостоятельная, полностью независимая программная система вторичной обработки радиоинтерферометрических наблюдений ВОРИН. Предложен новый алгоритм автоматического исключения неопределённости групповой задержки. Предложен новый способ абсолютизации земной и небесной системы координат, выводимых из РСДБ наблюдений.

— Из обработки 4-х летнего ряда наблюдений с помощью программного комплекса ВОРИН впервые было подтверждено существование эффекта полюсного прилива. Найденные числа Лява для полюсного прилива $h_p = 0.65 \pm 0.20$, $\ell_p = 0.11 \pm 0.05$ находятся в хорошем согласии с предсказанием теории.

— Обработан ряд РСДБ наблюдений, выполненных в 1994-95 годах, в которых принимала участие станция Симеиз (Крым), оснащённая приёмниками ИПА РАН. Определено положение этой станции в системе ITRF93. Вертикальная координата станции найдена с погрешностью 5 см, а горизонтальные координаты определены с субсантиметровой точностью.

Практическая ценность работы определяется возможностью использования программного комплекса ВОРИН для обработки радиоинтерферометрических наблюдений в целях определения координат станций, а также для организации службы параметров вращения Земли. В настоящее время программный пакет является одним из штатных средств комплекса КВАЗАР-КВО. Разработанный комплекс алгоритмов и программ является инструментом для проведения научных исследований в области геодинамики.

Апробация работы и публикации. Основные результаты, полученные в диссертации, докладывались на семинарах ИПА, а также на следующих научных конференциях:

1. Школа-совещание по программам ФОН, КОНФОР, КВАЗАР, Киев, октябрь 1991.
2. Третья международная Орловская конференция: "Изучение Земли как планеты методами астрономии, геофизики и геодезии", Одесса, сентябрь 1992.
3. Российская астрометрическая конференция, Пулково, октябрь 1993.
4. 6-ая Генеральная Ассамблея WEGENER, Санкт-Петербург, июнь 1994.
5. 26-ая Радиоастрономическая конференция, Санкт-Петербург, сентябрь 1995.

По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ. В работе [7], написанной в соавторстве, диссертанту принадлежит обработка РСДБ наблюдений, а соавторам — разработка и наладка аппаратуры, используемой в эксперименте.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения. Она изложена на 127 страницах, включает 39 рисунков и 12 таблиц. В списке литературы 206 библиографических ссылок. В первой главе излагается схема редукций РСДБ наблюдений, вторая глава посвящена методике оценивания параметров модели, третья глава содержит краткое описание пакета ВОРИН, и, наконец, в четвёртой главе приводятся результаты обработки рядов РСДБ наблюдений. В заключении перечислены основные результаты, выносимые на защиту.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

При проведении РСДБ экспериментов на каждой станции сети на магнитную ленту записывается сигнал от наблюдаемых компактных внегалактических источников. Полученные ленты свозятся в центр обработки, где проводится первичный анализ. На стадии первичной или радиотехнической обработки на специализированном процессоре вычисляется взаимнокорреляционная функция сигналов, на основе которой для каждого наблюдения определяются 4 параметра: групповая временна́я задержка, частота интерференции — скорость изменения фазовой задержки, амплитуда и фаза функции взаимной когерентности. Групповая задержка несёт в себе информацию о взаимной ориентации вектора базы и направления на наблюдаемый источник. Предметом диссертационной работы является исследование и развитие методов вторичной обработки наблюдений, во время которой по измеренным значениям групповой задержки и частоты интерференции определяются геодинамические параметры, а также создание на их основе программного обеспечения.

Особенностью РСДБ наблюдений является то, что они, во-первых, позволяют решить очень широкий класс задач: построение земной системы координат, вывод поля скоростей станций, построение небесной системы координат, опирающейся на компактные радиоисточники, определение параметров вращения Земли, уточнение чисел Лява и некоторые другие задачи. Во-вторых, РСДБ техника наблюдений в отличие от конкурирующих с ней техникой лазерной локации ИСЗ и GPS, позволяет найти решение перечисленных задач без привлечения дополнительных измерений.

Обработку радиоинтерферометрических наблюдений можно разделить на два этапа: редукцию наблюдений, когда на основе модели предвычисляются теоретические значения задержки и частоты интерференции, и этап оценивания, во время которого находятся поправки к параметрам модели.

Как показал анализ отечественной и зарубежной литературы, в ней практически отсутствует полное и последовательное изложение методов редукций РСДБ наблюдений. Те редукционные модели, которые опубликованы, быстро устаревают, в них опущены некоторые важные элементы. В то же время при обработке высокоточных наблюдений, именно скрупулёзный учёт всех тонких эффектов является решающим фактором, обеспечивающим точность конечного результата. В литературе также практически отсутствует описание методов оценивания параметров модели РСДБ наблюдений.

В диссертации построена собственная модель измерений на основе опубликованных фрагментов моделей, использованных другими авторами. При этом уточнены некоторые формулировки, модель расширена и дополнена новыми положениями.

В диссертации развиты алгоритмы оценивания параметров модели на основе метода наименьших квадратов (МНК) в применении к задаче обработки РСДБ наблюдений. Разработанная процедура уравнивания наблюдений включает в себя помимо классического МНК, многогрупповой МНК, наложение условий связи, наложение стабилизирующих ограничений, перевзвешивание, нахождение неопределённости в измерении задержки.

Важнейшей своей задачей диссертант считал последовательное и полное изложение использованных алгоритмов для того, чтобы сделать создаваемый программный комплекс открытым для использования и облегчить процесс его дальнейшего совершенствования.

В результате этой работы создана самостоятельная, полностью независимая программная система ВОРИН (Вторичная Обработка РадиоИнтерферометрических Наблюдений), опирающая на международные стандарты и учитывающая последние достижения в данной области.

Глава I. Редукция наблюдений.

В этой главе кратко изложен алгоритм предвычисления задержки и частоты интерференции, который может быть представлен следующей схемой:

— Вычисление вектора базы в квазиинерциальной системе координат. Учитывается перемещение станций вследствие вращения Земли. Учитываются прецессия, нутация, суточное вращение Земли, движение полюса. Учитываются перемещения станций вследствие приливов в теле Земли, океанической нагрузки, атмосферной нагрузки, полюсного прилива. Учитываются вековые перемещения участков земной коры в соответствии с тектоническими моделями. Вводится коррекция за перемещение фазового центра приёмной аппаратуры в ходе наблюдений.

— Вычисление геометрической задержки с учётом релятивистских эффектов.

— Вычисление тропосферной задержки. По метеоданным предвычисляется тропосферная задержка в зените, и на основе картирующей функции вычисляется тропосферная задержка для каждого наблюдения.

— Вычисление структурной задержки. В зависимости от имеющейся в распоряжении информации о распределении радиояркости наблюдаемого источника, вычисляется коррекция задержки за наличие у источника структуры либо по Гауссовой модели, либо по карте.

— Вычисление ионосферной задержки.

— Вычисление парных эффектов. Учитываются коррекции за зависимость между тропосферной задержкой и геометрической и за зависимость тропосферной задержки от антенного выноса.

Отличие от подходов других авторов состоит в следующем:

— Частота интерференции вычисляется аналитически.

— Учитываются высокочастотные вариации координат полюса и аргумента UT1.

— Учитывается движение станций, вызванное послеледниковым поднятием по модели ICE-3G.

— Учитывается коррекция за атмосферную нагрузку.

— Вычисление всевозможных эффектов, влияющих на задержку и частоту интерференции, может производиться по разным моделям. По литературным источникам собрана обширная коллекция различных моделей. Так в предложенный алгоритм включает 12 моделей зависимостей тропосферной задержки от высоты источника, 6 моделей приливов в теле Земли, 5 моделей тектоники плит и т.д. Наличие большого выбора моделей позволяет работать в ”режиме совместимости” с другими программными системами обработки наблюдений и кроме того даёт возможность исследовать, как влияет на конечный результат выбор той или иной модели.

Детальное сравнение предложенной в диссертации схемы редукций и моделей, принятых в пакетах MODEST и OCCAM, показало, что предложенная модель является наиболее полной.

Было произведено сравнение редукционных вычислений пакета ВОРИН и пакета OCCAM версии 3.2. При использовании одной и той же конфигурации модели и одних и тех же априорных значений параметров максимальная разность предвычисления задержки составила 5.8 пикосекунды (2 мм). Был выявлен ряд расхождений. На основе исходного текста пакета OCCAM была выполнена частичная реконструкция алгоритма редукций. На основе проведённой реконструкции в программном комплексе ВОРИН были реализованы варианты процедур предвычисления задержки, которые позволили осуществить "режим совместимости" с OCCAM 3.2, то есть заставить программу редукций ВОРИН вычислять значения задержки как можно близкие к тем, которые вычисляет OCCAM. Максимальная разность предвычисления задержки в режиме совместимости составила 0.2 пикосекунды (70 микрон).

Глава II. Оценивание параметров модели.

2.1 Грубое оценивание.

Измерения групповой задержки несут в себе неопределённость, кратную величине, обратно пропорциональной минимальному разнесению частот в полосе синтеза. "Сырые" разности измеренной и теоретически предвычисленной задержки (о-с) обычно содержат случайные скачки, кратные 100 наносекундам. Основной вклад в о-с вносит рассинхронизация и дрейф хода часов, вклад которых, как правило, на 3–6 порядков превышает вклад всех остальных параметров. Предложенный алгоритм грубого оценивания находит коррекцию за неопределённость для каждого наблюдения и определяет предварительные значения рассинхронизации, дрейфа хода и дрейфа частоты для всех часов станций (кроме станции, принятой за опорную). Суть алгоритма состоит в том, что частота интерференции не содержит неопределённости, и поэтому по о-с для этой величины можно найти дрейф хода и дрейф частоты часов для каждой базы и затем исключить их влияние из о-с по задержке. После этого, используя тот факт, что характерный разброс скорректированных о-с примерно на порядок меньше константы неопределённости измерения групповой задержки, удаётся разделить наблюдения, имеющие разные значения неопределённости, а также отфильтровать выбросы.

2.2 Оценивание параметров по наблюдениям одной серии.

После коррекции о-с за неопределённость измерения групповой задержки и за найденные предварительные значения параметров функции часов станций производится оценивание параметров модели. В процедуре оценивания можно выделить следующие шаги:

— В соответствие с запросом на оценивание автоматически формируется список оцениваемых параметров. Для ряда параметров наряду с их средним значением на интервале серии наблюдения может оцениваться и скорость их изменения. Тропосферная задержка в зените и функция часов могут моделироваться N-сегментным линейным сплайном. Для этого случая предусмотрен алгоритм автоматического выбора границ сегментов.

— Формируются условные уравнения, выбираются масштабные коэффициенты.

— Составляются уравнения условий связи и уравнения стабилизирующих ограничений. Могут быть наложены следующие условия связи: условия замыкания треугольников для компонент векторов баз, условия инвариантности новой земной системы координат относительно произвольного сдвига, поворота, переносной скорости, вращения; условия инвариантности новой небесной системы координат относительно поворота. При оценивании быстроменяющихся параметров, которые моделируются линейным сплайном, накладываются стабилизирующие ограничения, требующие, чтобы скорость изменения параметра на смежных сегментах сплайна была одинаковой. Уравнениям таких условий приписывается определённый вес, и они входят в систему уравнений наряду с условными уравнениями.

— Находится решение условной системы уравнений по взвешенному методу наименьших квадратов с учётом условий связи и стабилизирующих ограничений.

— Производится поиск выбросов. Если они находятся, наблюдения с аномальной невязкой удаляются из последующего анализа и выполняется коррекция решения за выбросы. Вычисляется статистика решения.

— Если оценка математического ожидания суммы квадратов остаточных невязок сильно отличается от найденной суммы квадратов, то производится коррекция весов и выполняется новое решение.

2.3 Совместное оценивание параметров по наблюдениям многих серий.

Для определения небесной и земной систем координат, а также для вывода поля скоростей станций необходимо совместно уравнивать сотни тысяч наблюдений, полученных на многих сериях. Развитый в работе алгоритм оценивания по наблюдениям одной серии обобщается на случай глобального оценивания. Предложенный алгоритм решения глобальной системы уравнений рассматривается как обобщение метода исключения для обращения разреженной матрицы, возникающей при совместном оценивании глобальных параметров, которые считаются не меняющимися на всём интервале наблюдений, и локальных параметров, определяемых для каждой серии. Показано, что полученный алгоритм совпадает с алгоритмом последовательного метода наименьших квадратов, выведенного другими авторами иным способом.

2.4 Абсолютизация систем координат.

Стандартная задача вывода систем координат и поля скоростей станций может быть решена из обработки РСДБ наблюдений лишь с точностью до 16 произвольных постоянных, задающих начало систем координат, их абсолютную ориентацию и начальную эпоху. Для разрешения трудностей, связанных с вырожденностью матрицы нормальных уравнений из-за сложной линейной зависимости оцениваемых параметров, предлагается следующий подход. На первом шаге получается ”нулевое” решение, которое выводится при условии, что новая земная системы координат не имеет сдвига и поворота, а также переносной скорости и вращения относительно системы координат, использовавшейся в качестве априорной. Кроме того, накладывается условие, что новая небесная система не имеет поворота относительно старой системы. На втором шаге на основе явно сформулированных граничных условий, определяющих нуль-пункт и ориентацию систем, находятся коэффициенты линейного преобразования "нулевых" систем координат. Выполняется также коррекция серий ПВЗ. Полученные системы координат уже не зависят от входных каталогов.

Глава III. Программный комплекс ВОРИН.

В третьей главе дано описание программного комплекса ВОРИН. Программный комплекс разрабатывался диссертантом в течение 6 лет и в настоящей момент включает в себя 1133 модуля общим объёмом 185 тыс. строк исходного текста и 64 файла документации суммарным размером около 600 страниц. Сформулируем основные принципы разработки.

Основной целью разработки комплекса ВОРИН является создание программной среды, обеспечивающей исследование и реализацию оптимальных методов вторичной обработки РСДБ наблюдений. Пакет ВОРИН обладает широким набором средств для анализа качества наблюдений и диагностики сбоев аппаратуры. Программный комплекс специально спроектирован для массовой обработки наблюдений.

Комплекс решает следующие задачи:

— Архивация наблюдений.

— Подготовка разнообразных вспомогательных файлов.

— Просмотр наблюдений.

— Редукционная обработка.

— Оценивание параметров модели.

— Редактирование наблюдений.

— Визуализация результатов.

— Тестирование процедур анализа данных.

Все процедуры пакета написаны диссертантом самостоятельно. Пакет не содержит обращений к подпрограммам, написанным другими авторами. Программный комплекс работает под управлением операционной системой VAX/VMS. Основным языком программирования является ФОРТРАН-77. Для того, чтобы достичь максимальной производительности, значительная часть процедур линейной алгебры, а также некоторые другие программы написаны на Ассемблере. На протяжении всей разработки строго выдерживалась единая дисциплина программирования и общие правила документирования.

Пакет ВОРИН состоит из трёх подсистем: подсистемы конечного пользователя, подсистемы разработки программ и подсистемы поддержки разработки.

— Подсистема конечного пользователя содержит готовые программы, решающие те или иные задачи вторичной обработки.

— Подсистема разработки программ содержит модули, решающие частные задачи, возникающие при вторичной обработке. Все модули легко читаемы, имеют удобный интерфейс и спроектированы так, чтобы обеспечить их безболезненную модификацию. Используя эти модули и включив собственные подпрограммы, пользователь может легко построить свою программу вторичной обработки на основе уже имеющихся в его распоряжении программных средств.

— Подсистема поддержки разработки включает в себя средства поддержки среды программирования. В неё входят системные процедуры и автоматизированные средства ведения документации. Размер комплекса — свыше 3 тыс. страниц исходного текста делает немыслимым его сопровождение и модификацию без развитых средств автоматизации обработки текста и документирования.

Особое внимание было уделено тестированию комплекса. Помимо тестов, которые разрабатывались при написании отдельных процедур и уничтожались после отладки модулей, были специально разработаны средства, которые позволяют нам в каждый момент убедиться, что программы работают верно и что очередное улучшение программного комплекса не внесло новых ошибок. Принята следующая многоуровневая схема тестирования.

1. Уровень отдельных модулей. Разработаны программы, которые позволяют ряд важных процедур астрономических вычислений, процедур линейной алгебры, подпрограмм редукционной обработки и т. п. вызывать по отдельности и анализировать их работу при различных значениях входных параметров. Результаты можно проверить по Астрономическому ежегоднику, таблицам или путём ручных вычислений.

2. Исследование промежуточных результатов редукций. Предусмотрена возможность выполнить редукционную обработку в отладочном режиме. В этом режиме создаётся специальный файл, в который для каждого наблюдения записывается свыше 300 промежуточных параметров этапа редукционных вычислений. Предоставляется возможность извлекать информацию из этого файла, комбинировать её с другими данными, формировать таблицы, строить графики зависимости одного параметра от другого, что позволяет детально исследовать вклад разных компонент модели редукций.

3. Тестирование частных производных. Вычисление всех частных производных по параметрам модели контролируется тем, что приращение к задержке, вызванное поправками к параметрам модели может быть вычислено как по аналитическим выражениям (в рабочем режиме), так и путём коррекции априорных значений параметров (в тестовом режиме). Разработаны средства автоматизации подобного рода сравнения.

4. Тестирование процедур оценивания параметров модели РСДБ наблюдений. Программа тестирования два раза вызывает процедуру редукционных вычислений с разными значениями априорных поправок к модели редукций, вычисляет приращения задержки и частоты интерференции, добавляет шум к полученным "о-с", имитируя процесс наблюдений. Выполняются следующие тесты:

— Оценивание одиночных параметров.

— Оценивание группы запросных параметров.

— Вращательный тест для координат источников.

— Вращательный тест для координат станций.

— Одиночный тест на оценивание координат станций.

— Одиночный тест на оценивание скоростей станций.

— Групповой тест на оценивание координат и скоростей станций.

— Тест на оценивание сегментированных параметров.

Глава IV. Результаты обработки рядов РСДБ наблюдений.

4.1 Обработка ряда наблюдений по программе IRIS.

В целях подробного исследования комплекса программ ВОРИН и проверки его работоспособности был обработан четырёхлетний ряд наблюдений, выполненных по программе IRIS в 1984–87 годах, содержащий *117 319* наблюдений, полученных в течение 289 суточных серий.

Было выполнено несколько решений. Взвешенное среднеквадратическое стандартное уклонение остаточных невязок для различных решений лежит в диапазоне 35–44 пикосекунд (1.2–1.5 см).

Из обработки были найдены серии параметров вращения Земли: UT1, координаты полюса, поправки к углам нутации. Проведённое сравнение результатов, найденных с помощью пакета ВОРИН, и результатов обработки этих же наблюдений, выполненных в НАСА пакетом CALC/SOLVE, показало, что среднеквадратические уклонения разности определения параметров вращения Земли не превышают 1 mas. Дисперсия разностей определения ПВЗ, найденных в НАСА, и ряда C04, выведенного международной службой вращения Земли, отличается от дисперсии разностей ВОРИН–НАСА незначимо. Дисперсия разностей серий ПВЗ, найденных пакетом ВОРИН по одним и тем же наблюдениям, но по разным моделям оценивания, лежит в том же диапазоне. Это позволяет заключить, что указанные значения среднеквадратических уклонений разностей являются характеристикой точности определения параметров вращения Земли по РСДБ наблюдениям тех лет и что программный комплекс ВОРИН позволяет достичь этой точности.

Из обработки были также получены ряды измерений длин баз. По линейному тренду, выделенному из этих рядов, для трансатлантических баз уверенно определяется скорость перемещения Евразиатской плиты относительно Северо-Американской. Найденные значения скорости изменения длин баз хорошо согласуются как с результатами, полученными в НАСА по этим же наблюдениям, так и с моделью NNR-NUVEL1A, построенной на основе геофизических данных.

В глобальном решении при совместной обработке всего ряда наблюдений получены оценки координат станций и скоростей их изменения, каталоги положений радиоисточников, определены числа Лява для приливов в теле Земли второго порядка:

$$\begin{aligned} h_2 &= 0.615 \ \pm 0.006 \\ \ell_2 &= 0.0850 \pm 0.0009 \end{aligned} \qquad (1)$$

которые в пределах формальной ошибки совпадают с теоретическим значениям: $h_2 = 0.609$ и $\ell_2 = 0.0852$ Построен каталог положений 13 источников, а также каталог координат и скоростей 5 станций. Среднеквадратические уклонения разностей положений источников построенного каталога и каталога GLB867, полученного в НАСА, составили 0.02 msec для прямых восхождений и 0.6 mas для склонений. Среднеквадратическое уклонение разностей найденных координат станций по отношению к каталогу GLB867 составило 2 см.

Отдельно было проведено решение с целью определения полюсного прилива — деформации земной коры, вызванной изменением центробежной силы из-за движения полюса. Для этого при проведении редукций полюсный прилив не учитывался, но вычислялись частные производные от задержки по числам Лява для полюсного прилива. Из глобального решения были найдены следующие оценки:

$$\begin{aligned} h_p &= 0.65 \pm 0.20 \\ \ell_p &= 0.11 \pm 0.05 \end{aligned} \qquad (2)$$

Из теоретических соображений можно было ожидать, что числа Лява для полюсного прилива будут близки к числам Лява для приливов второго порядка. Следует подчеркнуть, что амплитуда изменения высоты станции вследствие полюсного прилива не превышала 25 мм, а амплитуда горизонтального смещения не превосходила 3 мм. Обнаружение такого тонкого эффекта может рассматриваться как генеральный тест предложенной методики обработки РСДБ наблюдений.

4.2 Определение координат станции Симеиз.

С лета 1994 года в тесной кооперации между НАСА, Крымской Астрофизической обсерватории, Институтом прикладной астрономии и другими организациями проводятся геодезические РСДБ эксперименты с участием станции Симеиз (Крым). Важность этих наблюдений определяется тем, что они являются одними из первых проводимых на территории стран СНГ наблюдений такого рода, и также тем, что в них частично используется отечественная аппаратура.

Автором обработано *8* суточных серий наблюдений, в которых принимала участие станция Симеиз. Оценивались координаты станции Симеиз в системе ITRF93. Взвешенное среднеквадратическое уклонение остаточных невязок для разных серий принимало значение от 31 до 57 пикосекунд.

По имеющимся результатам обработки *8* серий РСДБ наблюдений, в которых собрано *21 168* измерений групповой задержки и частооты интерференции, выведено положение станции Симеиз в системе ITRF93 на эпоху 1993.0:

$$\begin{aligned} X &= 387\,523\,114.7 \pm 2\,\text{см} \\ Y &= 255\,120\,736.9 \pm 2\,\text{см} \\ Z &= 443\,979\,634.2 \pm 4\,\text{см} \end{aligned} \qquad (3)$$

Скорость станции Симеиз предполагалась совпадающей со скоростью, предсказанной моделью NNR-NUVEL1. Среднеквадратическое уклонение ряда топоцентрических координат станции Симеиз для вертикальной, восточной и северной компоненты составило 47, 5 и 4 милиметра соответствено.

4.3 Обработка ряда наблюдений по программе NEOS-A.

В целях подготовки к вступлению в международную службу вращения Земли IERS в качестве центра обработки данных был обработан непрерывный ряд РСДБ наблюдений, выполненных по программе NEOS-A с 4 января 1994 года по 3 октября 1995 года. Начиная с июля 1995 года, данные регулярно принимаются в режиме срочной службы ПВЗ. Обработано 92 серии, содержащие *97052* измерений задержки и частоты интерференции. Оценивались параметры вращения Земли: аргумент UT1, координаты полюса, поправки к углам нутации и некоторые другие параметры. Среднее значение взвешенных среднеквадратических уклонений остаточных невязок для 92 серий составило 43.6 пикосекунды. Сравнение построенного ряда параметров вращения Земли со сводным рядом IERS C04, выведенным Международной службой вращения Земли, показало, что не обнаружено статистически значимого сдвига и дрейфа системы найденных параметров, а среднеквадратические разности полученных величин характеризуется следующими значениями: для аргумента UT1 — 0.027 msec, для X координаты полюса 0.27 mas, для Y координаты полюса — 0.24 mas и для поправок к углу нутации в долготе и нутации в наклонности — 0.39 и 0.21 mas соответственно. Результаты сравнения показали, что ряд ПВЗ, полученный с помощью программной системы ВОРИН, по точности не уступает рядам, полученным из этих же наблюдений зарубежными программными комплексами, и что пакет ВОРИН может быть с успехом использован для ведения срочной службы ПВЗ, основанной на РСДБ наблюдениях.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Последовательное и полное изложение методики обработки РСДБ наблюдений для определения небесной и земной систем координат, а также поля скоростей станций, параметров вращения Земли, чисел Лява.

2. Комплекс программ ВОРИН, решающий все основные задачи вторичной обработки геодезических РСДБ наблюдений.

3. Результаты обработки четырёхлетнего ряда РСДБ наблюдений, выполненных по программе IRIS: серии поправок к углам нутации, координаты полюса, UT1, числа Лява, каталог координат и скоростей станций, каталог положений источников. Оценка чисел Лява для полюсного прилива.

4. Результаты обработки ряда наблюдений, выполненных на станции Симеиз в 1994-95 годах, уточнённые координаты этой станции.

5. Результаты определения параметров вращения Земли из ряда РСДБ наблюдений по программе NEOS-A, полученные в режиме срочной службы ПВЗ.

ПЕЧАТНЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Петров Л.Ю. Программный комплекс вторичной обработки радиоинтерферометрических наблюдений внегалактичеческих источников (ВОРИН). Препринт № 48, Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, 1992.

2. Петров Л.Ю. Применение программного комплекса обработки РСДБ наблюдений "ВОРИН" для определения параметров вращения Земли. В *Изучение Земли как планеты методами астрономии, геофизики и геодезии. Труды III Орловской конференции*, Яцкив Я.С., ред., стр. 146–151. Киев, 1994.

3. Petrov L. Software VORIN for secondary data analysis of geodetic VLBI observations. In *The sixth General Assembly of Wegener, St. Petersburg, June 20th — June 24th*, Pearlman J., P. Wilson, eds, pp. 51–56. Smithsonian Astrophysics Observatory, 1994.

4. Петров Л.Ю. Вторичная обработка геодезических РСДБ наблюдений. I. Модель редукции. Сообщения ИПА № 74, Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, 1995.

5. Петров Л.Ю. Вторичная обработка геодезических РСДБ наблюдений. II. Модель редукции. Сообщения ИПА № 75, Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, 1995.

6. Петров Л.Ю. Вторичная обработка геодезических РСДБ наблюдений. Оценивание параметров модели. Сообщения ИПА № 76, Институт прикладной астрономии, Санкт-Петербург, 1995.

7. Иванов Д.В., А.В. Ипатов, В.В Мардышкин, Л.Ю. Петров, С.Г. Смоленцев, А.Е. Вольвач. Первые результаты определения пололжения станции Симеиз по РСДБ наблюдениям в составе международных сетей. В *XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов*, стр. 230–231. Санкт-Петербург, 1995.

8. Петров Л.Ю. Программная системы вторичной обработки РСДБ-наблюдений. В *XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов*, стр. 287–288. Санкт-Петербург, 1995.

9. Петров Л.Ю. Определение из РСДБ наблюдений деформаций земной коры, вызванных полюсным приливом. В *XXVI Радиоастрономическая конференция. Тезисы докладов*, стр. 327. Санкт-Петербург, 1995.