

УДК 521.2

## Результаты измерения горизонтальной скорости движения радиоастрономической станции Симеиз

*А.Е. Вольвач<sup>1</sup>, Л.Ю. Петров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Крымская астрофизическая обсерватория, РТ-22, Кацивели, Крым 98688 Украина

<sup>2</sup> Центр космических полетов имени Годдарда НАСА, Гринбелт, Мэриленд, 20771 США

Поступила в редакцию 25 февраля 2005 г.

**Аннотация.** Из РСДБ наблюдений, выполненных согласно геодинимическим программам в течении 1994 – 2000 гг., получены оценки горизонтальной скорости движения радиоастрономической станции Симеиз, расположенной на Южном берегу Крыма. Определено положение радиоастрономической станции “Симеиз” с точностью в несколько мм. Проанализирован полный набор 3 миллионов наблюдений и определено, что станция перемещается относительно Евразийской тектонической плиты со скоростью  $2.8 \pm 0.9$  мм/год в северо-восточном направлении. Возможные систематические эффекты были тщательно исследованы и оценена надежность определения формальных ошибок. Было изучено качество работы приемников излучения и водородного стандарта частоты. Была исследована стабильность станции относительно местных маркеров и обнаружено увеличение наклона азимутальной оси радиотелескопа со скоростью  $2''6$  в год.

RESULTS OF MOTION OF THE RADIO ASTRONOMY STATION SIMEIZ, by *A.E. Volvach and L.Yu. Petrov* The estimates of horizontal velocity of motion of the radioastronomical station Simeiz were obtained using VLBI observations carried out under geodynamics programs during 1994 – 2000 years. The position of the Simeiz station was determined with accuracy several mm. The complete set of 3 million VLBI observations has been analyzed and it was found that the station moves with respect to the Eurasian tectonic plate considered as rigid with rate  $2.8 \pm 0.9$  mm/yr in north-east direction. Thorough investigation of possible systematic effects has been done and reliability of the estimate of the uncertainty has been evaluated. Stability of the station with respect to local marks was investigated and an inclination of the azimuthal axis of the telescope with velocity  $2''6$  per year was disclosed.

**Ключевые слова:** компактные радиоисточники, радиоинтерферометрия, геодинамика, тектоническое движение плит

---

## 1 Введение

В настоящее время метод радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), предложенный Матвеевко и др. (1965), является наиболее точным в астрометрии. Глобальная сеть радиоастрономических станций регулярно проводит наблюдения внегалактических источников. Наблюдательные программы являются частью общих усилий для решения задач построения земной и небесной систем координат, а также определения параметров вращения Земли, проводимых под эгидой международной РСДБ службы (МРС) (Ванденберг, 1999). Эти наблюдения могут быть использованы

для точных измерений различных эффектов (Соверс и др., 1998). В данной работе мы сосредоточим внимание на проблемах определения положения и скорости движения станции Симеиз, известной также под именем "CRIMEA".

22-м радиотелескоп (РТ-22) НИИ "Крымская астрофизическая обсерватория" расположен на южном побережье Крымского полуострова около поселка Симеиз в 20 км к западу от города Ялта. Он участвовал в самых первых межконтинентальных РСДБ наблюдениях в сентябре 1969 года по астрофизическим программам (Бродерик и др., 1970). Телескоп был модернизирован в 1994 году в рамках сотрудничества между Украиной (КрАО и ГАО НАНУ), США (NASA/GSFC) и Россией (ИКИ РАН и ИПА РАН). РТ-22 КрАО был дооснащен системой регистрации Марк-IIIА (Кларк и др., 1985) и совмещенным облучателем на волны 3.6 и 13 см (NASA/GSFC), высокочувствительными охлаждаемыми радиометрами на эти же волны (ИПА РАН) и водородным стандартом частоты Ч1-70 (ИКИ РАН). Интерференционный отклик был получен в первом же тестовом эксперименте 20 июня 1994 года. Эта модернизация позволила начать наблюдения по геодинамическим программам и продолжить астрофизические исследования структуры и динамики внегалактических объектов с более высокой чувствительностью (Кларк и др., 1995; Петров и др., 1995). Радиотелескоп РТ-22 вместе с двумя лазерными станциями и постом измерения уровня моря, расположенными в радиусе 3 км, образуют геодинамический полигон "Симеиз-Кацивели" (Болотин и др. 1995).

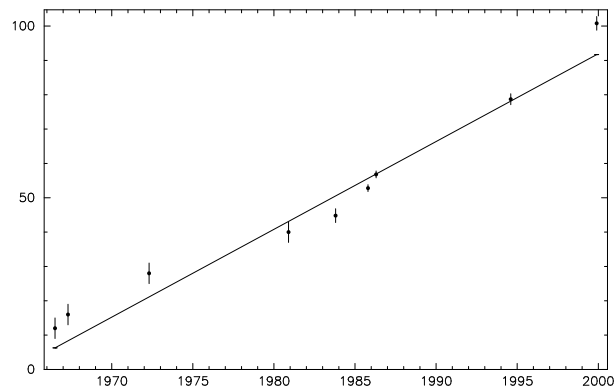
Метод РСДБ позволяет достигать точности определения положения станции лучше, чем 0.2 мм (Хазе, Петров, 1999). Однако, фактическая точность существенно ниже, так как имеется ряд причин, вносящих систематические ошибки. Во-первых, радиоэлектронное оборудование обычно работает хуже, чем требуется, из-за воздействия паразитных сигналов различного происхождения. Стандарт частоты может иметь недостаточную стабильность, приемники могут работать хуже ожидаемого. Это скорее исключение, когда в процессе наблюдений не фиксируется каких-либо проблем с радиоэлектроникой. Сбои в работе аппаратуры порождают инструментальные ошибки. Во-вторых, наша модель наблюдений неполна: неточно учитывается тропосферная задержка сигнала, недостаточно точно смоделированы периодические изменения положения станций, вызываемые океаническими и атмосферными нагрузками, а также ряд других факторов. В-третьих, опорная точка антенны может смещаться относительно местных маркеров из-за разного рода деформаций, что является источником локальных ошибок. Тщательное исследование всех видов систематических ошибок и учет их при анализе позволяет повысить точность измерений и надежность результатов.

## 2 Антенна

Радиотелескоп РТ-22 имеет полноповоротное параболическое зеркало диаметром 22 м и фокусным расстоянием 9.525 м. Среднеквадратичная ошибка изготовления поверхности равна 0.25 мм. Эффективная площадь радиотелескопа на волнах 3.5 и 13 см составляет не менее  $200\text{ м}^2$  и не зависит от угла места наблюдаемого источника. Антенна имеет горизонтально-азимутальную монтировку, горизонтальная ось смещена относительно азимутальной оси на величину  $-1.8 \pm 0.2$  мм. Рабочий диапазон антенны составляет по азимуту<sup>1</sup>  $[-210^\circ, 210^\circ]$ , по высоте  $[-1^\circ, 85^\circ]$ . Максимальная скорость вращения антенны составляет 1.5 град/сек. Система управления телескопом обеспечивает точность наведения  $10''$ . Фундамент радиотелескопа имеет глубину 9 м, из которых 3 м - гравий и 6 м - бетон. Горизонтальная ось антенны расположена на высоте 14.998 м от уровня фундамента антенны. РТ-22 расположен в 80 метрах от береговой линии Черного моря.

Опорной точкой радиотелескопа является точка проецирования горизонтальной оси вращения на вертикальную. Координаты этой точки по отношению к внегалактическим источникам излучения определяются из наблюдений. Однако эта точка может перемещаться относительно локальной области, где расположен радиотелескоп. Для того, чтобы выявить локальное движение, определились координаты этой точки относительно локальных маркеров путем измерения положения осей антенны. Два метода использовались для определения положения осей антенны: анализ массива

<sup>1</sup> Здесь и далее азимут отсчитывается от севера к востоку



**Рис. 1.** Наклон вертикальной оси телескопа (секунды дуги) относительно локальной отвесной линии в зависимости от времени (годы)

поправок координат, применяемых при наведении на источник, и прямое измерение теодолитом положения маркеров, расположенных на антенне.

Компактные мощные источники, координаты которых известны с точностью лучше  $1''$ , наблюдались на частотах 22 и 36 ГГц (Нестеров, 1985). Определялось угловое положение антенны, при котором регистрируемый сигнал имел максимальную мощность, и находились поправки между предвычисленным положением антенны и положением, измеренным датчиками. Разности в азимутах и высотах между истинными значениями и значениями, измеренными датчиками, аппроксимировались следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta A &= -a_1 \sin H \cos A + a_2 \sin H \sin A + a_3 \sin H + a_4 \cos H + a_5 \cos H \sin A + \\ &\quad a_6 \cos H \cos A + a_7; \\ \Delta H &= h_1 \sin A + h_2 \cos A + h_3 \sin H + h_4 \cos H + h_5, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $A$  – азимут,  $H$  – высота,  $a_i$ ,  $h_j$  – коэффициенты, определяемые методом наименьших квадратов (МНК). Параметры  $a_1$ ,  $h_1$ ,  $a_2$ ,  $h_2$  характеризуют наклон вертикальной оси телескопа. Вычисленные коэффициенты использовались в системе управления РТ-22 для учета систематических ошибок наведения.

Положение вертикальной оси РТ-22 эпизодически определялось в 1966 – 1999 гг. с помощью теодолита. Для этого теодолит устанавливался на опорно-поворотном устройстве РТ-22, телескоп переустанавливался по азимуту через 10 – 20 градусов и измерялись углы направлений на маркеры на телескопе. Результаты измерений аппроксимировались синусоидой с помощью МНК. Более тщательно положение вертикальной и горизонтальной осей РТ-22 исследовалось во время специальной кампании Самойленко (1996) в 1995 г. Самойленко делает вывод, что "при более детальном рассмотрении всего массива данных, есть основания полагать, что азимутальная ось описывает в пространстве конус и совершает плавные случайные колебания. Однако суммарный эффект не превосходит  $\pm 1$  мм". Мы можем рассматривать данную оценку как верхний предел кратковременной стабильности положения опорной точки антенны.

На рис. 1 представлена зависимость наклона вертикальной оси телескопа относительно локальной отвесной линии с течением времени. Наклон вертикальной оси увеличивается (Пиза-эффект) со скоростью  $2''/6$  в год в направлении азимута  $116^\circ$ . При дальнейшей обработке принималась модель Пиза-эффекта: вращение телескопа относительно центра масс. Скорость перемещения опорной точки антенны из-за Пиза-эффекта равна 0.1 мм/год в направлении на юг и 0.2 мм/год в направлении на восток.

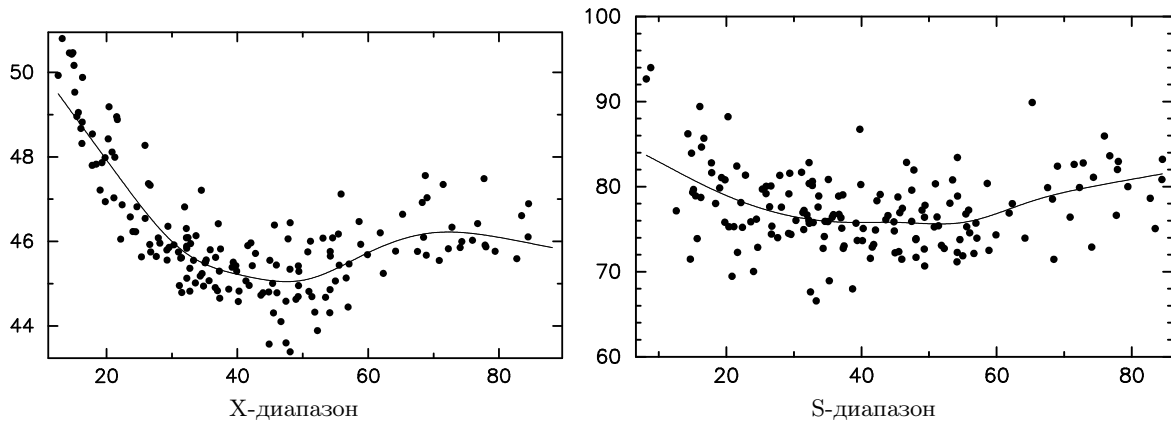


Рис. 2. Зависимость температуры системы (К) от угла места антенны над горизонтом (градусы). Эксперимент 17-AUG-98

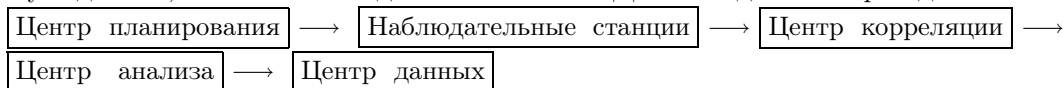
### 3 Аппаратура

Малощумящие приемники на длины волн 3.6 см (X-диапазон) и 13 см (S-диапазон) установлены в первичном фокусе антенны. Угол облучения совмещенного облучателя составляет 140 градусов на уровне  $-10$  дБ. Облучатель позволяет одновременно принимать излучение с левой и с правой круговой поляризацией на волне 13 см и с левой либо с правой круговой поляризацией на волне 3.6 см, хотя только одна поляризация может регистрироваться во время наблюдений.

Приемники изготовлены на основе супергетеродинной схемы с использованием высокочастотных FET усилителей. Для уменьшения шумов приемной системы входные каскады приемников и FET усилители охлаждаются микрокриогенной системой замкнутого цикла до температуры 20 К. Фокусировка облучающей системы и измерения эквивалентной плотности потока приемной системы (SEFD) проводились по наблюдениям источников с известными в данных диапазонах потоками: Tau-A, Vir-A, Cas-A и Cyg-A до и после каждой наблюдательной сессии. Типичные значения SEFD: 800 Ян для волны 3.6 см и 1200 Ян для волны 13 см. Температура шумов системы измеряется перед каждым наблюдением. На рис. 2 показаны зависимости шумовой температуры системы от угла высоты антенны над горизонтом для X- и S-диапазонов соответственно, полученные по результатам одной суточной серии наблюдений. Рост температуры системы на углах ниже  $30^\circ$  над горизонтом связан с увеличением оптической толщины атмосферы Земли.

### 4 Наблюдения

Путь данных, связанных с геодинимическими РСДБ наблюдениями приведен на схеме:



Центр планирования наблюдений формирует управляющие файлы для каждой антенны и рассылает их на наблюдательные станции по электронной почте. Управляющий файл определяет установки оборудования и расписание наблюдений каждого источника. Последовательность наблюдений оптимизирована в соответствии с главной целью наблюдательной сессии.

Все наблюдательные станции используют программный пакет Field System (Химвич, 2000), с помощью которого интерпретируются управляющие файлы и производится управление движением антенны и работой системы регистрации данных. Система спроектирована для работы в автоматическом режиме практически без вмешательства оператора.

Наблюдательные станции выполняют две основные функции: а) наведение радиотелескопа на источник; б) сопровождение источника и регистрацию сигнала в 14 каналах с полосой 2-МГц каждый на частотах 8.2 – 8.6 ГГц и 2.2 – 2.3 ГГц. Время записи обычно составляет 60 – 300 сек. После завершения наблюдения одного источника телескоп сразу же переводится на следующий источник. Обычно в течение одной сессии наблюдаются 30 – 100 компактных источников с плотностями потоков 0.1 – 10 Ян, которые более или менее равномерно распределены по небу. Приблизительно половина времени наблюдательной сессии тратится на перевод антенны с источника на источник. Длительность одной сессии составляет 24 часа. Каждая станция за этот период наблюдает 200 – 500 сканов источников и записывает на магнитные ленты 2 – 5 Терабит данных. Затем ленты отсылаются в один из центров корреляционной обработки: Институт Макса Планка в Бонне, Хайтекскую обсерваторию или Военно-морскую обсерваторию США.

В центре корреляции на специальном процессоре, называемом “коррелятор”, производится обработка всех данных со станций, участвовавших в сессии. Коррелятор вычисляет функцию взаимной когерентности записанного сигнала. Для каждого скана, каждой базы и каждой полосы частот вычисляются 5 параметров: широкополосная групповая задержка, узкополосная групповая задержка, амплитуда, фаза и частота интерференции. Результаты корреляции и пост-корреляционного анализа записываются на кассеты и передаются в центр анализа.

Линейная комбинация групповых задержек на одной базе, полученная в X- и S-полосах, свободная от вклада ионосферы и отнесенная к опорному моменту времени внутри скана, является базовой величиной и будет в дальнейшем называться “наблюдение”. Центр анализа выполняет предварительную обработку: разрешение неопределенности групповых задержек, удаление выбросов, определение модели часов, уточнение весов наблюдений, калибровку и архивирование данных. Параметры упрощенной модели: координаты станций, функция часов, атмосферная задержка – определяются с помощью МНК. Оценивается качество работы станции и сообщаются обнаруженные проблемы. Затем заархивированные данные и результаты анализа передаются в центр данных МРС, где они становятся доступными всем пользователям Интернета без каких-либо ограничений в тот же самый день, когда был выполнен анализ, в пределах 7 – 90 дней после наблюдений.

## 5 Анализ данных

Для анализа были использованы все доступные двухполосные MARK-III РСДБ наблюдения за 20 лет: 1979.59 – 1999.85, 2 937 сессии, 2 719 961 наблюдение, включая 34 успешных сессий с участием станции Симеиз на протяжении 4.5 лет (1994.48 – 1998.96 гг.), во время которых было получено 17 299 групповых задержек.

Обработка проводилась с помощью программного пакета CALC/SOLVE. Были вычислены теоретические значения групповой задержки и частные производные по параметрам модели и сформированы малые разности  $O - C$  между наблюдаемыми и предвычисленными значениями задержки. Оценки параметров модели были получены с помощью МНК с учетом индивидуальных весов наблюдений.

747 источников и 121 станция, участвовавшие в наблюдениях, были разделены на три категории: а) первичные; б) вторичные; в) не используемые.

Оцениваемые параметры принадлежат к одной из трех групп:

- **глобальные** (определены по всему массиву наблюдений): координаты и скорости движения 43 первичных станций; координаты 358 первичных источников;
- **локальные** (определены по каждой сессии): координаты полюса,  $UT_1$ , скорость изменения  $UT_1$ , углы нутации; координаты вторичных станций и источников, градиент атмосферной задержки для всех станций и скорость его изменения, ход часов на станциях, смоделированный полиномом 2-ой степени, дополнительный параметр синхронизации часов для некоторых баз;
- **сегментные** (определены на сегменте продолжительностью 0.5 – 1.0 часа): коэффициенты линейного сплайна моделирующие функцию часов (продолжительность 1 час) и атмосферную задержку (продолжительность 0.5 часа) для каждой станции.

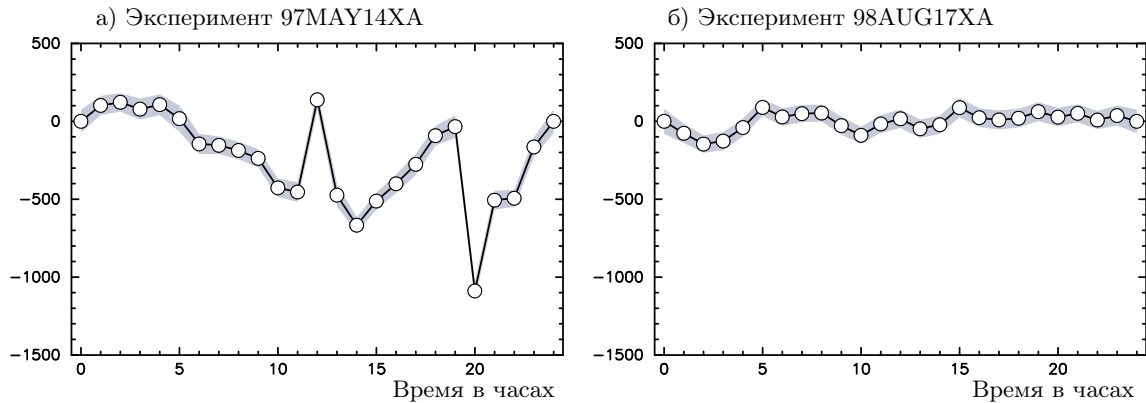


Рис. 3. Оценки функции часов (пикосек) в течение 24-часового эксперимента

На оцениваемые глобальные параметры были наложены следующие идентифицирующие ограничения: отсутствие вращения новой системы координат станций, координат источников и поля скоростей станций, отсутствие сдвига новой системы координат станций и поля их скоростей по отношению к системам взятым в качестве априорных. Всего использовалось 15 уравнений с ограничениями глобальных параметров. Были также наложены стабилизирующие ограничения между двумя смежными сегментными параметрами: ограничения на скорость изменения атмосферной задержки и на скорость изменения функции часов. Обратные веса уравнений этих ограничений были 40 пикосек/час и  $2 \cdot 10^{-14}$  сек/сек соответственно.

Был использован специальный быстрый алгоритм прямого решения задачи МНК с 1.1 миллионами неизвестных, который учитывает разреженность нормальной матрицы и регулярность ее портрета.

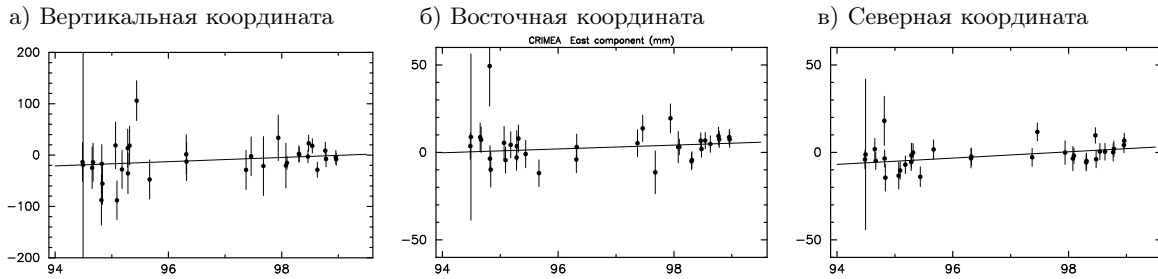
Станция Симеиз принималась как первичная станция в решении 1, поэтому ее положение и скорость были получены с использованием всех данных. Общий средний квадрат взвешенных остаточных невязок (wtms) решения составила 24.4 пикосек с  $\chi^2/\text{ndf} = 1.03$ . Wtms остаточных невязок наблюдений с участием станции Симеиз равен 39.3 пикосек.

### 5.1 Оценка качества наблюдений

Качество работы станции не было одинаковым в течение всего периода наблюдений. Уже в 1995 г. было замечено, что оценки функции часов показали случайные флуктуации на уровне 300 – 1000 пикосек, что на порядок больше ожидаемого. Было установлено, что водородный стандарт частоты, который подает опорный сигнал с частотой 5 МГц для всех компонент системы, имел неудовлетворительную стабильность. Поэтому старый стандарт частоты был заменен, и новый начал работать с 1 февраля 1998 г. Оценки функции часов до и после замены стандарта частоты показаны на рис. 3.

В решении 2 координаты станции Симеиз находились для каждой сессии независимо. Графики изменения со временем вертикальной, восточной и северной компоненты координат станции, полученные в этом решении, приведены на рис. 4. Вертикальные отрезки на рис. 4 соответствуют формальной ошибке определения координаты.

На графиках видно, что оценки координат станций имеют разброс больше, чем он должен быть на основе приписываемых формальных ошибок наблюдений, полученных из отношения сигнал/шум, и вариаций, зависящих от наблюдательной сессии и базы. Эти вариации координат станций были квадратически добавлены к исходным формальным ошибкам наблюдений для того чтобы получить отношение суммы взвешенных квадратов остаточных невязок к их математическому ожиданию близким к единице. Разброс оценок координат станции, особенно для вертикальной координаты, больше для первой части набора данных, когда использовался старый стандарт частоты.



Вертикальная скорость:  $3.0 \pm 2.9$  мм/год    wrms = 27.0 мм     $\chi^2/\text{ndg} = 7.2$

Восточная скорость:     $2.1 \pm 0.5$  мм/год    wrms = 4.6 мм     $\chi^2/\text{ndg} = 3.1$

Северная скорость:     $1.3 \pm 0.6$  мм/год    wrms = 5.5 мм     $\chi^2/\text{ndg} = 5.8$

**Рис. 4.** Оценки топоцентрических координат станции Симеиз (мм) в зависимости от времени (годы)

Положение станции на эпоху 1997.0 и скорость ее перемещения были получены МНК из анализа временных рядов оценок координат. Мы пренебрегли корреляциями между оценками для различных эпох.  $\chi^2$  тест был сделан для оценки соответствия линейной параметрической модели движения станции и стохастической модели, которая описывает статистические характеристики ошибок наблюдений. Отношение взвешенной суммы квадратов остаточных невязок к их математическому ожиданию, обозначенному как  $\chi^2/\text{ndg}$ , оказалось существенно больше, чем 1. Это указывает на присутствие добавочного шума, который наши параметрические и стохастические модели не принимают во внимание должным образом. Применялась процедура перевзвешивания: формальные ошибки координат станций были модифицированы путем квадратического добавления вариации  $v$ :  $\sigma_{ni}^2 = \sqrt{\sigma_{oi}^2 + v^2}$  для того, чтобы сделать отношение суммы квадратов остаточных невязок к их математическому ожиданию близким к единице. Здесь индекс  $o$  обозначает старые формальные ошибки, а индекс  $n$  обозначает новые ошибки после перевзвешивания. Вариация  $v$  рассматривалась постоянной до и после замены водородных часов и имеет разрыв в тот момент. Два значения вариации были найдены независимо для каждого компонента координат. Используемый алгоритм описан Петровым (Петров, 1995). Эта коррекция несколько изменила оценки скоростей движения станции и их формальные ошибки.

Было найдено, что неудовлетворительная стабильность водородных часов сильнее воздействует на оценки вертикальных координат, чем на оценки горизонтальных координат. В решении 3 горизонтальная компонента координат и скорость движения станции Симеиз рассматривались как глобальный параметр, в то время как вертикальная координата была оценена для каждой сессии независимо. Окончательно оценка вектора скорости движения станции была сформирована следующим путем: а) горизонтальные компоненты являются оценками, полученными в решении 3; б) вертикальная компонента вектора скорости определена как линейный тренд временного ряда оценок из решения 3 с применением перевзвешивания; в) ковариационная матрица была вычислена как  $\text{Cov}_n(x_i, x_j) = s_i s_j \text{Cov}_o(x_i, x_j)$ , где  $s_k = \frac{\sigma_{nk}}{\sigma_{ok}}$ . Эти манипуляции позволяют получить более надежные значения координат и скорости движения станции, а также оценки их ошибок.

## 5.2 Преобразования поля скоростей

Однако следует понимать, что положение и скорость одиночной станции не имеют смысла, если система координат не была задана. Наблюдательные величины инвариантны относительно 15-параметрической группы линейных преобразований, которые включают вращение и сдвиг координат и скоростей всех станций, вращение координат источников, сдвиг и линейный дрейф рядов параметров ориентации Земли (Петров, 1999). Это означает, что поле скоростей определено лишь с точностью до произвольного сдвига и вращения. Идентифицирующие ограничения, которые накладывались при решении условных уравнений, вынудили полученное поле скоростей не иметь

вращения и сдвига относительно априорного поля скоростей. Чтобы сравнивать полученный каталог координат и скоростей станций с другими моделями и каталогами, необходимо применять линейное преобразование, которое удовлетворяет явно заданным граничным условиям.

Мы рассмотрим две задачи. Первая задача: какова остаточная скорость станции Симеиз относительно Евразийской тектонической плиты?

Девять постоянных РСДБ станций с периодом наблюдений более 3 лет расположены на Евразийской плите: SIMEIZ, DSS65, EFLSBERG, MATERA, MEDICINA, NYALES20, ONSALA60, SESHAN25 и WETTZELL. Для того, чтобы определить остаточную скорость каждой станции относительно твердотельного движения плиты, сперва разобьем станции на опорные и исследуемые. Твердотельное движение означает, что плита как целое имеет только поступательное движение и вращение; опорные станции перемещаются в соответствии с движением плиты, в то время как для исследуемых станций допускается иметь произвольную скорость движения относительно плиты. Преобразование поля скоростей ищется в форме

$$\vec{v}_n = \vec{v}_o + \vec{T} + \vec{\Omega} \times \vec{r}, \quad (2)$$

где  $\vec{v}_o$  – старый вектор скорости,  $\vec{T}$  – вектор переносной скорости,  $\vec{\Omega}$  – вектор угловой скорости вращения,  $\vec{r}$  – вектор положения станции. Это уравнение может быть записано в форме

$$\vec{v}_n = \vec{v}_o + \widehat{M} \vec{s}, \quad (3)$$

где

$$\widehat{M} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & r_3 & -r_2 \\ 0 & 1 & 0 & -r_3 & 0 & r_1 \\ 0 & 0 & 1 & r_2 & -r_1 & 0 \end{pmatrix} \quad \vec{s} = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \Omega_3 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Уравнение (2) преобразуется к локальной топоцентрической системе координат умножением слева на матрицу вращения  $\widehat{P}$ :

$$\widehat{P}_i \widehat{M}_i \vec{s} = \vec{u}_i - \widehat{P}_i \vec{v}_{oi}, \quad (5)$$

где  $\vec{u}$  – вектор скорости станции в топоцентрической системе координат после преобразования. Мы можем найти вектор  $\vec{s}$  из уравнений (4) если мы зададим вектор  $\vec{u}$  в соответствии с моделью твердотельного движения. Для этого приравниваем вектор  $\vec{u}_i = 0$  для опорных станций в нашем решении. Четыре станции: DSS65, EFLSBERG, NYALES20 и WETTZELL были отобраны как опорные, уравнениям для вертикальной компоненты станций DSS65, EFLSBERG, NYALES20 были приписаны малые веса, поэтому им было позволено иметь произвольное вертикальное движение. Система уравнений была решена по МНК с полной матрицей весов  $\widehat{W}$ :

$$\widehat{W} = \widehat{D} \left( \widehat{P}_a \text{Cov}(v, v^\top) \widehat{P}_a^{\text{top}} + \widehat{A} \right)^{-1}, \quad (6)$$

где  $\widehat{P}_a$  – блочно-диагональная матрица, сформированная из матриц  $\widehat{P}_i$ ,  $\widehat{A}$  – диагональная матрица аддитивных поправок к весам,  $\widehat{D}$  – диагональная матрица, которая содержит элементы 1 и  $1 \cdot 10^{-5}$ . Последнее значение фактически исключает то уравнение, которому оно соответствует. Матрица  $\widehat{A}$  имела значения  $(0.4 \text{ мм/год})^2$  на главной диагонали в нашем решении.

Преобразование 3 и преобразование к локальной топоцентрической системе координат применялись как к опорным, так и к исследуемым станциям. Ковариационная матрица была вычислена следующим образом:



$$\begin{aligned} \widehat{\text{Cov}}(v_n, v_n^\top) &= \widehat{P}_a \widehat{\text{Cov}}(v_o, v_o^\top) \widehat{P}_a^\top + \widehat{P}_a \widehat{M} \widehat{\text{Cov}}(s, s^\top) \widehat{M}^\top \widehat{P}_a^\top \\ \widehat{\text{Cov}}(v_n, v_n^\top) &= \widehat{P}_a \widehat{\text{Cov}}(v_o, v_o^\top) \widehat{P}_a^\top + \widehat{P}_a \widehat{M} \widehat{\text{Cov}}(s, s^\top) \widehat{M}^\top \widehat{P}_a^\top + \\ &\quad \widehat{P}_a \widehat{\text{Cov}}(s, s^\top) \widehat{M} \widehat{W} \widehat{\text{Cov}}(v_o, v_o^\top) \widehat{P}_a^\top + \widehat{P}_a \widehat{\text{Cov}}(v_o, v_o^\top) \widehat{W} \widehat{M}^\top \widehat{\text{Cov}}(s, s^\top) \widehat{P}_a^\top. \end{aligned} \quad (7)$$

Верхнее выражение использовалось для исследуемых станций, а нижнее – для опорных станций. В последнем выражении принимается во внимание статистическая зависимость старой скорости движения и вектора  $\vec{s}$ .

Результаты представлены в таблице 1, а поле остаточных горизонтальных скоростей показано на рис. 5.

**Таблица 1.** Остаточные скорости движения станций относительно Евразийской плиты

Станция	Вертикальная	Восточная	Северная	Корр.	Гор. ск.	Азимут С	
	(мм/год)	(мм/год)	(мм/год)	Е-N	(мм/год)	(Град)	
DSS65	1.8 ± 1.5	-0.0 ± 0.2	0.0 ± 0.1	0.85	0.0 ± 0.1	300° ± 300° h	
EFLSBERG	-0.3 ± 0.8	0.3 ± 0.3	-0.3 ± 0.2	0.03	0.5 ± 0.2	130° ± 30° h	
MATERA	1.1 ± 0.9	1.1 ± 0.4	4.9 ± 0.5	0.30	5.0 ± 0.5	12° ±	5° f
MEDICINA	-2.8 ± 0.8	1.8 ± 0.4	2.1 ± 0.4	0.13	2.8 ± 0.4	39° ±	8° f
NOTO	0.6 ± 1.1	-0.9 ± 0.5	5.2 ± 0.4	0.30	5.3 ± 0.4	350° ±	6° f
NYALES20	2.3 ± 1.5	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	-0.92	0.0 ± 0.0	40° ±	300° h
ONSALA60	3.1 ± 0.6	-1.0 ± 0.4	-0.6 ± 0.4	-0.09	1.2 ± 0.4	240° ±	20° f
SESHAN25	2.2 ± 5.0	-0.4 ± 2.9	-3.8 ± 3.5	-0.49	3.8 ± 3.4	190° ±	50° f
WETTZELL	-0.0 ± 0.1	-0.2 ± 0.2	0.3 ± 0.2	-0.04	0.4 ± 0.2	320° ±	30° hv
<b>SIMEIZ</b>	<b>2.7 ± 3.0</b>	<b>1.3 ± 0.7</b>	<b>2.5 ± 0.9</b>	<b>0.07</b>	<b>2.8 ± 0.9</b>	<b>27° ± 15° f</b>	

Последняя колонка содержит статус станции: исследуемая (f), опорная для горизонтального движения (h), опорная для вертикального и горизонтального движения (hv).

Вторая задача состоит в том, чтобы определить координаты и скорость движения станции Симеиз в какой-нибудь хорошо известной системе координат. Мы нашли параметры преобразования (2), минимизируя разности в координатах и скоростях движения первичных станций относительно ITRF97 каталогов. Координаты и скорости станций в каталогах системы ITRF97 рассматривались как точно известные, в то время как оценки скоростей движений, полученные при решении 3, рассматривались как стохастические параметры с ковариационной матрицей, полученной в этом решении. Элементы ковариационной матрицы компонент скорости станции Симеиз были калиброваны, как это было упомянуто выше. Мы получили следующие координаты станции Симеиз на эпоху 1997.0 и скорость их изменения в системе ITRF97:

$$\begin{aligned} X &= 3785231.073 \pm 0.004 \text{ м} & \dot{X} &= 5.5 \cdot 10^{-10} \pm 0.2 \cdot 10^{-10} \text{ м/сек} \\ Y &= 2551207.417 \pm 0.003 \text{ м} & \dot{Y} &= 4.9 \cdot 10^{-10} \pm 0.1 \cdot 10^{-10} \text{ м/сек} \\ Z &= 4439796.362 \pm 0.006 \text{ м} & \dot{Z} &= 2.3 \cdot 10^{-10} \pm 0.2 \cdot 10^{-10} \text{ м/сек.} \end{aligned} \quad (8)$$

## 6 Обсуждение результатов и заключение

Станция Симеиз расположена в 300 км от границы Евразийской плиты. Тектоническое движение в восточном Средиземноморье сложное; оно является результатом взаимодействия Евразийской, Африканской и Аравийской плит (Мюллер, Кале, 1993). Граница тектонических плит связана с Северо-Анатолийским трансформным разломом. Анатолийский блок движется в западном направлении вдоль разлома, его в свою очередь толкают в северном направлении Аравийская и Африканская



- опорные станции
- исследуемые станции

Рис. 5. Поле остаточных горизонтальных скоростей относительно Евразийской плиты

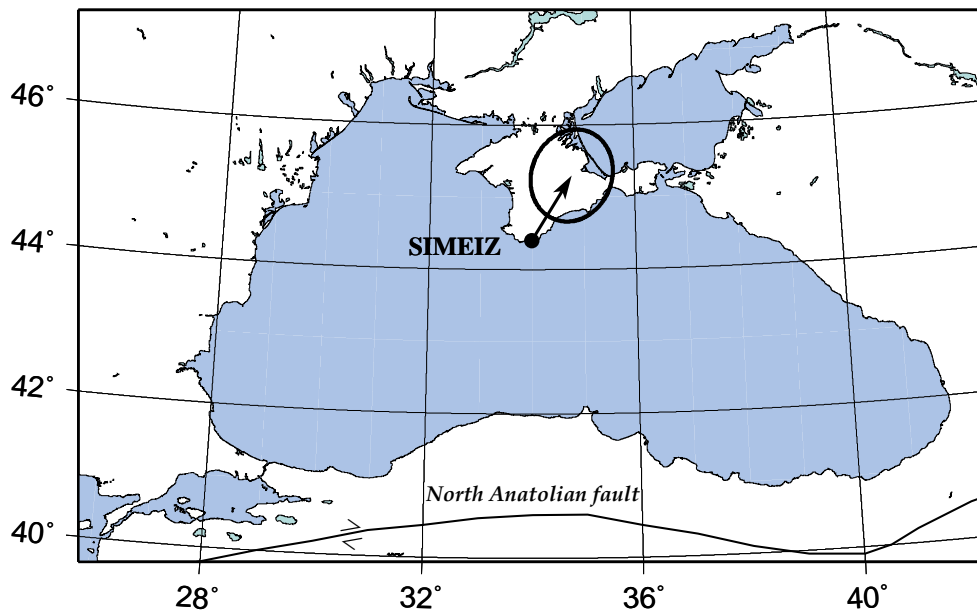


Рис. 6. Движение станции Симеиз

плиты, что вызывает деформацию в южной части Евразийской плиты. Полученная горизонтальная скорость  $2.8 \pm 0.9$  мм/год в направлении с азимутом  $27^\circ$  не противоречит этой модели.

Следует подчеркнуть, что остаточные скорости зависят от выбора опорных станций. Тот факт, что существуют четыре станции с отклонениями от твердотельного движения меньшими, чем формальная ошибка в оценках их скоростей, указывает на обоснованность предположения, что полученные скорости РСДБ станций удовлетворительно представляют тектоническое движение. Моделирование показало, что скорость движения станции Симеиз является относительно мало чувствительной к изменениям скоростей движений опорных станций. Изменения в скоростях движения опорных станций на величину  $3\sigma$  не вызвали изменения горизонтальной скорости движения станции Симеиз больше  $0.9$  от перевзвешенной формальной ошибки.

Пиза-эффект вносит вклад в локальную скорость движения опорной точки антенны на уровне  $0.2$  мм/год и был принят во внимание. Координаты опорной точки антенны относительно локальных маркеров были определены с точностью  $1$  мм в 1995 году, и повторные измерения будут проведены в будущем. На оценки вертикального движения серьезно воздействовала плохая работа до 1998 года водородного стандарта частоты, и мы не рассматриваем оценку полученного вертикального движения станции как надежную.

**Благодарности.** РСДБ наблюдения возможны только в результате скоординированных усилий большого количества людей. Авторы благодарны персоналу лаборатории радиоастрономии НИИ КраО, ГАО НАНУ, ИПА и ИКИ РАН за помощь в обслуживании аппаратуры на станции, М. Соргенте за его усилия при корреляции наблюдений, а также персоналу 120 других РСДБ станций, персоналу корреляторов и центров анализа. Мы благодарны Л.И. Матвеевко за полезное обсуждение, что способствовало улучшению данной работы. Авторы благодарны Ларисе Вольвач за перевод статьи на русский язык. Работа была частично поддержана грантом INTAS 94–4010.

## Литература

Болотин и др. (S. Bolotin, I. Gaiovitch, O. Khoda, A. Samoilenko, Ya. Yatskiv) // Космічна Наука і Технологія, додаток до журналу. 1995. V. 1. N. 2. P. 3.

- Бродерик и др. (Broderick, J.J., Vitkevich, V.V., Jauncey, D.L., Efanov A.V., Kellermann, K.I., Clark B.G., Kogan L.R., Kostenko V.I., Cohen M.H., Matveenko L.I., Moiseev I.G., Payne J., Hansson B.) // *Sov. Astron.* 1970. V. 47. P. 627.
- Ванденберг (N.Vandenberg) // *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry/Ed. N. Vandenberg: Greenbelt. USA. 1999. P. 308.*
- Кларк и др. (Clark, T.A., Corey, B.E., Davis, J.L., Elgered, G., Herring, T.A., Hinteregger, H.F., Knight, C.A., Levine, J.I., Lindquist, G.L., Ma, C., Nesman, C., Phillips, R.B., Rogers, A.E.E., Rönnäng, B.O., Ryan, J.W., Schupler, B.R., Shaffer, D.B., Shapiro, I.I., Vandenberg, N.R., Webber, J.C., Whitney, A.R.) // *IEEE Transactions. Geoscience and Remote Sensing.* 1985. V. 23. N. 4. P. 438.
- Кларк и др. (Clark, T.A., Bosworth, J., Vandenberg, N., Gordon, D., Himwich, E., Shaffer, D., Whitney, A., Corey, B., Niell, A., Tomas, C., Matveenko, L.I., Musin, R.K., Shevchenko, A.V., Nesterov, N.S., Stepanov, A.V., Nikitin, P.S., Ipatov, A.V., Mardyshkin, V.V., Ivanov, D.A., Yatskiv, Ya.S., Medvedskii, M.M.) // *Astron. Lett.* 1995. V. 21. N. 1. P. 116.
- Матвеенко Л.И., Кардашев А.С., Шоломицкий Г.Б. // *Известия вузов. Радиофизика.* 1965. Т. 8. N. 4. С. 651.
- Мюллер и Кале (S. Mueller, H-G. Kahle) // *Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal dynamic/Eds D. Smith and D. Tuccillo: Geodynamics Series.* 1993. V. 23. P. 249.
- Нестеров Н.С. // *Изв. Крымск. Астрофиз. Обсерв.* 1985. Т. 73. С. 189.
- Петров Л.Ю. // *Сообщение Института прикладной астрономии.* 1995. N. 76.
- Петров Л.Ю., Иванов Д.В., Ипатов А.В., Мардышкин В.В., Смоленцев С.Г., Вольвач А.Е., Нестеров Н.С. // *XXVI радиоастрономическая конференция. Санкт-Петербург.* 1995. С. 230.
- Петров (Petrov L.) // *The 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry/Eds W. Schlüter and H. Hase: BKG. Wettzell.* 1999. P. 138.
- Самойленко А.Н. // *Препринт Главной астрономической обсерватории НАНУ.* 1996. С. 3.
- Соверс и др. (O. Sovers, J. Fanselow, C. Jacobs) // *Reviews of Modern Physics.* 1998. V. 70. N. 4. P. 1393.
- Хазе и Петров (H. Hase, L. Petrov) // *The 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry/Eds. W. Schlüter and H. Hase: BKG. Wettzell.* 1999. P. 19.
- Химвич (E. Himwich) // *IVS 2000 General Meeting/Eds N. Vandenberg and K. Baver: Greenbelt. USA.* 2000. P. 86.