

## ИЗМЕРЕНИЕ ДВИЖЕНИЯ СТАНЦИИ СИМЕИЗ МЕТОДОМ РСДБ

Вольвач А. Е.<sup>1</sup>, Петров Л. Ю.<sup>2</sup>, Нестеров Н. С.<sup>1</sup>

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

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

По данным РСДБ-наблюдений, выполненных в течение 1994–2000 гг., определена горизонтальная скорость движения радиоастрономической станции Симеиз относительно Евразийской тектонической плиты со скоростью  $2.8 \pm 0.9$  мм/год в северо-восточном направлении. Осуществлена привязка к местным маркерам. Установлено увеличение наклона вертикальной оси радиотелескопа со скоростью  $2.6''$  в год. Вертикальная скорость движения станции  $2.6 \pm 3.0$  мм/год.

### 1. Введение

Фундаментальная геодинимическая станция «Симеиз-Кацивели», расположенная на берегу Черного моря рядом с поселком Симеиз, имеет две лазерные станции наблюдений ИСЗ, GPS-приемник, пост измерения уровня моря и радиотелескоп РТ-22 в радиусе 3 км друг от друга. 22-м радиотелескоп (РТ-22) Крымской астрофизической обсерватории участвовал в самых первых межконтинентальных радиоинтерферометрических наблюдениях со сверхдлинными базами (РСДБ) в сентябре 1969 года по астрофизическим программам [1]. Ранние узкополосные РСДБ-наблюдения обеспечивали дециметровую точность определения местонахождения РТ-22. Телескоп был модернизирован в 1994 году: система регистрации «Марк-ША» и совмещенный облучатель на волны 3.6 и 13 см были поставлены НАСА, высокочувствительные охлаждаемые радиометры на эти же волны поставлены ИПА РАН [2]. Интерференционный отклик был получен в первом же тестовом эксперименте 20 июня 1994 года. Эта модернизация позволила начать наблюдения по геодинимическим программам и продолжить астрофизические исследования структуры и динамики внегалактических объектов с более высокой чувствительностью.

Регулярные наблюдения внегалактических источников по геодинимическим наблюдательным программам, координируемые международной РСДБ-службой для астрометрии и геодинимики (МРС) [3], являются частью общих усилий для решения задач построения земной и небесных систем координат, а также определения параметров вращения Земли. Анализ этих наблюдений позволяет оценить параметры моделей геофизики и теории гравитации.

В данной работе мы представляем наше исследование определения положения и скорости движения РСДБ-станции Симеиз, используя наблюдения с 1994 года. Метод РСДБ, предложенный Матвеевко и др. [4], позволяет достигать точности определения положения станции лучше, чем 0.2 мм [5]. Однако есть ряд факторов, которые воздействуют на результаты измерений: инструментальные ошибки, неполнота геофизической модели, используемой для редукации наблюдений, перемещение опорной точки антенны относительно локальных маркеров из-за деформаций.

Исследование систематических ошибок и учет их при анализе позволяет получить более точные оценки определяемых параметров. Общий анализ систематических ошибок метода РСДБ выходит за рамки данной статьи. Здесь мы рассмотрим только специфические локальные эффекты, которые были нами обнаружены. Цель настоящей работы — определить скорость перемещения РСДБ станции Симеиз относительно других станций, расположенных на Евразийской плите.

## 2. Характеристики РСДБ станции Симеиз

Радиотелескоп РТ–22 имеет полноповоротное 22-м параболическое зеркало с фокусным расстоянием 9.525 м. Средняя квадратичная ошибка его поверхности равна 0.25 мм. Антенна имеет горизонтально-азимутальную монтировку, горизонтальная ось смещена относительно азимутальной оси на величину  $-1.8 \pm 0.2$  мм. Угол вращения антенны по азимуту (азимут отсчитывается от севера к востоку) составляет  $[-210^\circ, 210^\circ]$ , по высоте  $[-1^\circ, 85^\circ]$ . Максимальная скорость движения антенны составляет 1.5 град/с.

РТ–22 расположен в 80 метрах от береговой линии Черного моря. Фундамент радиотелескопа имеет глубину 9 м, из которых 3 метра гравия и 6 метров бетона. Горизонтальная ось антенны находится на высоте 14.998 метров от уровня фундамента антенны.

Опорная точка радиотелескопа имеет IERS–имя: "CRIMEA", ITRF–идентификатор: "Simeiz", IERS–номер: 12337S008, CDP–номер: 7332.

В первичном фокусе антенны установлены малoshумящие приемники на длины волн 3.6 см (X–диапазон) и 13 см (S–диапазон). Облучатель позволяет одновременно принимать излучение с левой и с правой круговой поляризацией на волне 13 см и либо с левой, либо с правой круговой поляризацией — на волне 3.6 см.

Приемники на основе супергетеродинного типа имеют малoshумящие высокочастотные FET–усилители, охлаждаемые до температуры 20 К. Фокусировка антенны и измерения эквивалентной плотности потока приемной системы (SEFD) проводились по источникам с известными потоками: Tau-A, Vir-A, Cas-A и Cyg-A. Типичные значения SEFD: 800 Ян для волны 3.6 см и 1200 Ян для волны 13 см. Перед каждым наблюдением проводились измерения температуры шумов системы и фазовая калибровка.

## 2. Наблюдения

Центр подготовки наблюдений планирует эксперименты, наблюдения проводятся в автоматическом режиме на частотах 8.2–8.6 ГГц и 2.2–2.3 ГГц. Регистрация сигнала осуществляется в 14 каналах 2 МГц каждый. Время записи составляет 60–300 с. В течение одной сессии наблюдаются 30–100 компактных источников, которые равномерно распределены по небу, с плотностями потоков 0.1–10 Ян. Длительность одной сессии из 200–500 сканов источников составляет 24 часа. Корреляционная обработка данных наблюдений проводится в Институте Макса Планка в Бонне, Хайтекской обсерватории или Военно-морской обсерватории США. Для каждого из сканов базы и полосы

частот вычисляются широкополосная и узкополосная групповые задержки, амплитуда, фаза и частота интерференции.

Линейная комбинация групповых задержек, полученная на одной базе в X- и S-диапазонах, исправленная от вклада ионосферы и отнесенная к опорному моменту времени внутри скана, является базовой величиной. После исправления за аппаратурные ошибки данные и результаты анализа передаются в центр данных MPC.

### 3. Анализ данных

Для анализа были использованы двухчастотные MARK-III РСДБ–наблюдения: 1979.59–2000.72, включая 36 сессий станции Симеиз за 1994.48–2000.36 гг.

Обработка проводилась с помощью программного пакета CALC/SOLVE. Были вычислены теоретические значения групповой задержки и частные производные по параметрам модели [6]. Оценки параметров модели были получены с помощью метода наименьших квадратов (МНК) с учетом индивидуальных весов наблюдений.

На оцениваемые глобальные параметры были наложены следующие идентифицирующие ограничения: отсутствие вращения новой системы координат станций, координат источников и поля скоростей станций, отсутствие сдвига 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.

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. Общий средний квадрат взвешенных остаточных невязок решения составил 25.2 пс, остаточных невязок наблюдений с участием станции Симеиз — 40.8 пс.

Положение и скорость одиночной станции не имеют смысла, если система координат не была задана. Наблюдаемые величины метода РСДБ инвариантны относительно 15-параметрической группы линейных преобразований, которые включают вращение и сдвиг координат и скоростей всех станций, вращение координат источников, добавление произвольного линейного тренда к ряду параметров ориентации Земли [7]. Это означает, что поле скоростей определено лишь с точностью до произвольного параллельного переноса 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?

9 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.

Вторая задача состоит в том, чтобы определить координаты и скорость движения станции Симеиз в известной системе координат. Мы нашли параметры преобразования, минимизируя разности координат и скоростей 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 рассматривались как стохастические параметры с ковариационной матрицей, полученной в этом решении.

Мы получили следующие координаты станции Симеиз на эпоху 1997.0 и скорость их изменения в системе ITRF97:

Координаты, м	Скорость, м/сек
$X = 3785231.070 \pm 0.006$	$X = 6.8^{-10} \pm 0.3^{-10}$
$Y = 2551207.415 \pm 0.004$	$Y = 5.0^{-10} \pm 0.4^{-10}$
$Z = 4439796.360 \pm 0.008$	$Z = 2.1^{-10} \pm 0.8^{-10}$

Скорости движения станций относительно Евразийской тектонической плиты представлены в табл. 1, а поле остаточных горизонтальных скоростей показано на рис. 1.

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

## 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 [8]. 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 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 есть 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 относительно мало чувствительна к изменениям скоростей движений опорных станций. Изменения в скоростях движения опорных станций на величину  $3\sigma$  не вызывали 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 г., и повторные измерения будут проведены в будущем.

Две лазерные станции наблюдения ИСЗ, расположенные в 2 км от радиотелескопа, CDP номер 1873 и 1893, регулярно проводили наблюдения с 1989 [9]. К сожалению, оценки скоростей этих станций, полученные из анализа наблюдения ИСЗ, отличаются друг от друга на 20–40 мм/год [10], что делает прямое сравнение скорости этих станций и РСДБ–станции Симеиз бессмысленным.

Мы надеемся, что оценки скорости постоянного GPS–приемника, установленного в мае 2000 г., будут получены через 3–5 лет, что позволит сравнить наши результаты.

РСДБ–наблюдения возможны только в результате скоординированных усилий большого количества людей. Авторы благодарны персоналу лаборатории радиоастрономии КраО, ГАО НАНУ, ИПА и ИКИ РАН за помощь в обслуживании аппаратуры на станции, М. Соргенте за его усилия при корреляции наблюдений, персоналу корреляторов и центров анализа. Мы благодарны Л. И. Матвеевко за полезное обсуждение. Работа была частично поддержана грантом INTAS 94-4010.

1. Бродерик Д. Д., Виткевич В. В., Джонси Д. Л. и др.//*Астрон. журн.*, т.47, 1970, с.784.
2. Clark T. A., Corey B. E., Davis J. L. et al.//*IEEE Transactions. Geoscience and Remote Sensing*, vol. 23, 1985, p. 438–449.
3. Vandenberg N.//*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry - 1999 Annual report*, ed. N. Vandenberg, Greenbelt, USA, 1999, p. 308.
4. Матвеевко Л. И., Кардашев А. С., Шоломицкий Г. Б.//*Известия вузов. Радиофизика*, т.8, 1965, N.4, с.651.
5. Hase H., Petrov L.//*In Proceedings of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, ed. by W. Schlueter and H. Hase, BKG, Wettzell, 1999, p.19.
6. Sovers O., Fanselow J., Jacobs C.//*Reviews of Modern Physics*, v. 70, 1998, N4, p. 1393–1454.
7. Petrov L.//*Proceedings of the 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry*, ed. by W. Schlueter and H. Hase, BKG, Wettzell, 1999, p.138.
8. Mueller S., Kahle H-G.//*Contribution of Space Geodesy to Geodynamics: Crustal dynamic*, ed. D. Smith and D. Tucoffe, *Geodynamics Series*. AGU, Washington D.C., v.23, 1993, p.249.
9. Tatevian S. K., Shtirberg L. S.//*Proceedings of the International workshop on geodetic measurements by the collocation of space techniques on Earth (GEMSTONE) 1999, January 25-28*. CRL, Tokyo, Japan, 1999, p.45–49.
10. Boucher C., Altamimi Z., Sillard P.//*The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97)*. IERS Technical Note 27. Observatoire de Paris, May 1999.

Таблица 1. Остаточные скорости движения станций относительно Евразийской плиты

Станция	Вертик. скорость, мм/год	Восточная, мм/год	Северная, мм/год	Горизонт. скорость, мм/год	Азимут, град	С
ДСС65	$2.1 \pm 1.5$	$-0.1 \pm 0.2$	$0.0 \pm 0.1$	$0.1 \pm 0.2$	$271 \pm 51$	H
ЕФФЕЛЬС-БЕРГ	$-0.5 \pm 0.8$	$0.5 \pm 0.3$	$-0.4 \pm 0.2$	$0.7 \pm 0.2$	$132 \pm 22$	H
МАТЕРА	$1.1 \pm 0.9$	$0.9 \pm 0.4$	$4.9 \pm 0.4$	$5.0 \pm 0.5$	$11 \pm 5$	F
МЕДИЧИНА	$-3.1 \pm 0.8$	$1.7 \pm 0.4$	$2.0 \pm 0.4$	$2.6 \pm 0.4$	$40 \pm 8$	F
НОТО	$0.6 \pm 1.0$	$-1.0 \pm 0.5$	$5.0 \pm 0.4$	$5.1 \pm 0.4$	$349 \pm 6$	F
НЬЮАЛИС20	$5.8 \pm 1.5$	$0.0 \pm 0.0$	$0.0 \pm 0.0$	$0.0 \pm 0.0$	$350 \pm 65$	H
ОНСАЛА60	$3.3 \pm 0.6$	$-1.0 \pm 0.4$	$-0.8 \pm 0.4$	$1.3 \pm 0.3$	$229 \pm 17$	F
ВЕТЦЕЛ	$-0.0 \pm 0.1$	$-0.3 \pm 0.2$	$0.4 \pm 0.2$	$0.5 \pm 0.2$	$322 \pm 25$	Hv
СИМЕИЗ	$2.7 \pm 3.0$	$1.3 \pm 0.7$	$2.5 \pm 0.9$	$2.8 \pm 0.9$	$27 \pm 15$	F

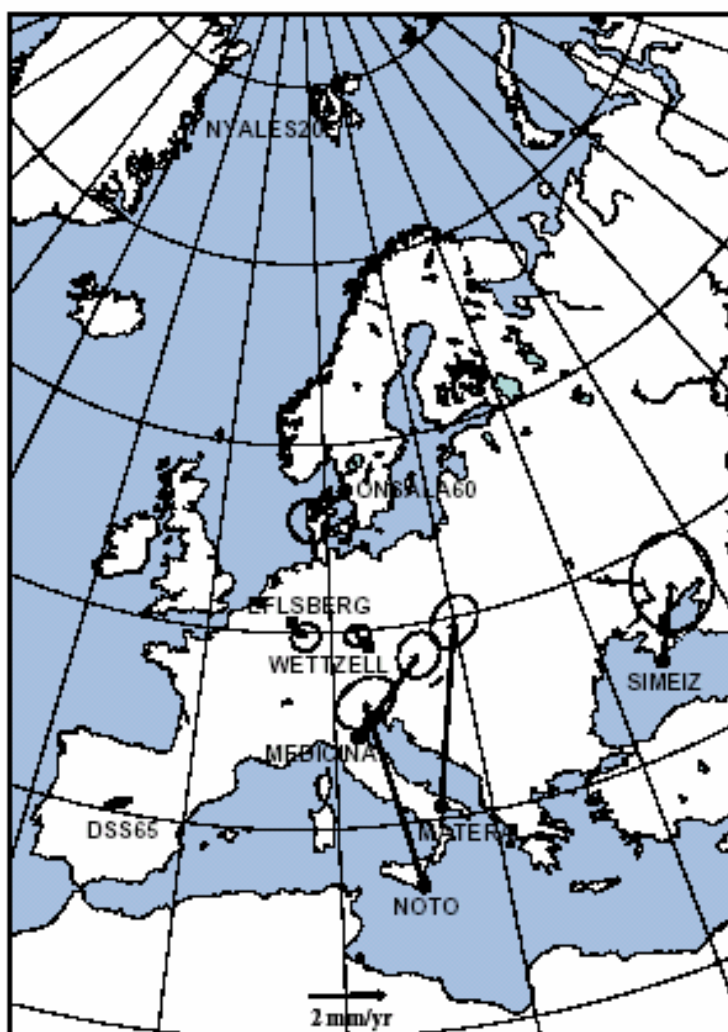


Рис. 1. Поле остаточных горизонтальных скоростей движения станций относительно Евразийской тектонической плиты