ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОППЛЕРОВСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ПО ЛИНИИ ИНТЕРКОСМОС И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЛУЖБ

С. Михай
Обсерватория Космической Геодезии
Пенц, ВНР

FÖMI Satellite Geodetic Observatory
H—1373 Budapest
Pf.: 546

Telephone: (27) 10 980
Telex: 28-22-41

Preprint No. 8.

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОППЛЕРОВСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ПО ЛИНИИ ИНТЕРКОСМОС И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЛУЖБ

С. Михай
Обсерватория Космической Геодезии
Пенц, ВНР

GEODETICAL USE OF DOPPLER SATELLITE POSITIONING IN FRAME OF INTERCOSMOS AND GEODETICAL SURVEYS

SZ.MIHALY
SATELLITE GEODETIC OBSERVATORY
PENC, HUNGARY

Доклад, представленный на Всесоюзной Научно-технической Конференции СССР, организованной в МИИГАиК, Москва, 13-15 октября 1987.г.

Paper presented at the Federal Scientific and Technical Conference of USSR organized at MIIGAiK, Moscow, October 13-15, 1987.

ГЕОДЕЗИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОППЛЕРОВСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ СПУТНИКОВ ПО ЛИНИИ ИНТЕРКОСМОС И ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ СЛУЖБ

С. МИХАЙ,
кандидат технических наук,
зав. отделом, Обсерватория Космической Геодезии,
Институт Геодезии, Картографии и
Дистанционного Зондирования
ВНР

1. Введение

За последние 10 лет космическая геодезия посредством допплеровских наблюдений спутников и в социалистических странах внедрилась в практику решения задач высшей геодезии.

В данной статье приводится метод и цель допплеровских наблюдений спутников системы Транзит в рамках Интеркосмос и Геодезических Служб социалистических стран. Описывается структура сотрудничества, инструментальный парк, математическое обеспечение, результаты разработок и проведенные допплеровские наблюдательные программы, а также критика работ по спутниковой геодезии в социалистических странах. Приводятся результаты допплеровских наблюдений, выраженные в геоцентрических пространственных координатах, с уделением особого внимания на наблюдательный сеанс WEDOC. Последняя глава посвящена перспективам допплеровских результатов в социалистических странах и, кроме того, в ней даются рекомендации по использованию нового метода глобальной позиционной системы ГПС, обещающего полное изменение повседневного геодезического производства в будущем.

2. Метод

Частота, излучаемая одним объектом, приходит ко второму объекту со сдвигом, величина которого зависит от скорости движения двух объектов друг относительно друга. Это открытие принадлежит профессору Кристиану Допплеру /Christian Doppler/, потому и явление получило название эффекта Допплера. Кристиан Допплер родился в Зальцбурге в 1803 году и был гражданином Австро-Венгерской монархии того времени. Свое замечательное открытие он сделал в 1842 году в Праге. С 1848 года он является профессором Маркшейдерской Школы в венгерском городе Шелмецбаня, а позже - профессором Технического Университета города Вены.

Зная излучаемую с борта спутника частоту и измерив ее допплеровский сдвиг у наземного пункта, можно определить скорость спутника относительно наземного пункта. Этот метод служит эффективным средством определения орбиты спутников или положения наземных пунктов.

На рис.1 геометрически показан принцип геодезического использования интегрального метода допплеровских наблюдений. Пролетающий спутник передает стабильную частоту f_S и элементы собственной орбиты. Излучаемая частота f_S приходит к приемнику наземной станции А сдвинутой на величину, зависящую от скорости света c и от изменения дальности до спутника за дифференциально малое время dr/dt, т.е. принимается следующая частота

$$f_R(t) = f_S \cdot \left(1 + \frac{1}{c}\frac{dr}{dt}\right)^{-1}$$

Частота f_R сравнивается с частотой приемника f_A и делается подсчет циклов разностной частоты между двумя моментами времени t_i и t_{i+1}, (где $i = 1, 2, 3, \ldots$ означает положение спутника). В результате получается допплеровское число

$$N_{i,\,i+1} = \int_{t_i}^{t_{i+1}} \left(f_R - f_A\right) dt$$

Моменты времени t_i измеряются или задаются заранее. Отметим, что приемник принимает и декодирует и переданные спутником элементы орбиты, по которым получают положение спутника $\bar{X}_i$ во всеобщей земной системе координат, относящееся к моменту времени t_i $(i= 1,2,3, \ldots)$.

Изменение дальности $\Delta r_{i,i+1}$ выражается двумя путями:

$$\Delta r_{i,\ i+1} = F_1 \left(N_{i,i+1},\ f_S,\ f_A,\ t_i,\ t_{i+1},\ \ldots \right) ,$$

$$\Delta r_{i,i+1} = F_2 \left(\bar{X}_A,\ \bar{X}_i,\ \bar{X}_{i+1} \right) .$$

При этом вид функций /моделей/ F_1 и F_2 известен.
$\bar{X}_A$ - положение станции А.

3. Система спутников Транзит

В мировой геодезической практике преобладает применение системы спутников Транзит США. Синоним названия WNSS, которое происходит из английского названия системы Navy Navigation Satellite Sysytem / по-русски Система Спутников Морской Навигации/.

Система Транзит ввелась в 1960 годах для военных навигационных целей США. По точности и другим характеристикам она оправдала себя и для решения точных геодезических задач. Поэтому в начале 70-ых годов система Транзит была открыта и для гражданских целей по всему миру.

3.1. Структура системы Транзит

Система Транзит состоит из космического сегмента, назеной службы и сегмента пользователей.

Космический сегмент содержит ряд спутников, плоскости орбит которых распределены равномерно по долготе. Высота спутников над поверхностью Земли составляет около 1000 км.

Их орбиты являются приблизительно круговыми и полярными. Одновременно работают 5 спутников. Они передают элементы собственной орбиты /бортовые эфемериды/, сигналы времени и эталонную частоту.

Наземная служба состоит из сети слежения и командного центра. В сети слежения имеются 4 станции, расположенные в районе Северной Америки, которые непрерывно наблюдают за всеми спутниками системы Транзит и сразу же производят автоматическую трансляцию своих наблюдений в командный центр. Командный центр производит сбор наблюдений, на основе последних 48-ми часовых наблюдений вычисляет орбиту, поизводит предикцию орбиты на 12 часов вперед и транслирует предиктируемую орбиту на борт спутника. Эта орбита /бортовые эфемериды/ и будет передаваться спутником. /Напомним, что кроме вышеуказанной наземной службы работает и другая сеть слежения, состоящая из 20 станций, равномерно расположенных по земному шару. По этой сети получают так называемые точные эфемериды, которые все таки не являются общедоступными/.

Сегмент использователей объединяет специалистов в области геодезии и навигации. На своих станциях /или кораблях/ они располагают приемниками, приспособленными для приема передач спутников системы Транзит. Приемники производят допплеровские наблюдения, по которым вычисляются координаты пункта наблюдения /точнее, координаты фазового центра антенны их приемников/. Для вычислений используется подходящее математическое обеспечение /вычислительная программа/. Напомним, что для геодезических целей применяют специальные приемники и вычислительные программы геодезической точности. Кроме того, сегмент использователей в области геодезии требует создания координационного центра, служащего для оптимальной организации наблюдений и достижения максимально высокой точности.

3.2. Точность определения наземных пунктов

Существует два класса точности: навигационный и геодезический. Для целей навигации /определение положения движущихся объектов/ вообще наблюдают только одно прохождение спутника. Точность навигации составляет всего лишь ± 20-30 м, что не удовлетворяет требованиям геодезии.

Точность геодезического определения геодезических пунктов, расположенных на земной поверхности, по допплеровским наблюдениям спутников системы Транзит характеризуется следующими данными:

а/ Точность определения геоцентрических координат одиночного геодезического пункта во всеобщей земной системе и на основе наблюдений за 3-10 дней: ± 2 - 4 м.

б/ Точность определения координат геодезических пунктов друг относительно друга при использовании одновременных наблюдений /транслокации или мультилокации/ и дифференциального подхода обработки: ± 0.2 - ± 0.5 м за 1-10 дней наблюдений. Такая точность релятивных определений сопоставима с наземными методами при расстояниях менее 500 км. При расстояниях между определяемыми пунктами, превышающих 500 км, упомянутая точность релятивных допплеровских определений превосходит точность наземных методов.

3.3 Области применения геодезических допплеровских определений

Геодезические допплеровские наблюдения спутников Транзит широко, оперативно и экономично применяются в следующих областях высшей геодезии:

- создание опорных геодезических сетей,
- создание региональных и континентальных сетей,
- привязка локальных и государственных геодезических сетей друг к другу и ко всеобщей земной системе координат,
- контроль и повышение жесткости государственных геодезиче-

ских сетей,
- определение /трансформирование/ высот геоида относительно всеобщего земного эллипсоида,
- интеграция горизонтальной и высотной наземных геодезических сетей /т.е. создание неразрывных трехразмерных сетей/.

4. Состояние применения допплеровского метода в социалистических странах

Данный раздел касается сотрудничества в рамках программы Интеркосмос и по линии Геодезических Служб социалистических стран. Здесь не будет рассмотрен допплеровский метод, внедренный в государственную программу исследования космоса в СССР, по различным причинам /в том числе и из-за точности/ ненашедший применения в геодезической практике.

4.1. Структура сотрудничества и организации допплеровских наблюдений

В странах, принимающих участие в программе Интеркосмос, научное использование допплеровского эффекта началось в конце 60-х годов. Небольшая группа специалистов Будапештского Технического Университета в Венгрии сконструировала допплеровский приемник, с помощью которого экспериментально велись наблюдения американских спутников Оскар, а результаты наблюдений использовались для позиционирования и исследования свойств распространения волн. Позже наблюдения были прекращены, однако теоретические исследования продолжались. Одновременно, в первой половине 70-х годов, специалисты Института Теоретической Астрономии АН СССР также проводили ценные научные исследования по спутниковому использованию допплеровского метода.

До конца 70-х годов в рамках программы Интеркосмос и по линии ГСССС исследования и использование допплеровского метода были очень разрозненными, не имелось в то время ни спутников, ни приемников, служащих для допплеровских измерений в геодезии. До настоящего времени в социалистических

странах наблюдается отставание допплеровского метода и вообще спутниковой геодезии. К сожалению и в настоящее время все еще не имеется спутниковой системы для геодезических целей, а финансовая поддержка работ по спутниковой геодезии оставляет желать много лучшего в наших странах.

В конце 70-х годов специалистами ВНР были подготовлены предложения, касающиеся возможностей применения допплеровского метода /в том числе и спутниковой системы Транзит/ для геодезических целей по линии Интеркосмос /см. [1] и [2]/. В рамках секции 6 /позже секция 4/ "Геодезическое и геофизическое использование ИСЗ" постоянной рабочей группы Космическая физика программы Интеркосмос в 1978 году была создана рабочая группа по допплеровским методам в спутниковой геодезии и геодинамике /см [3]/. Главной целью рабочей группы является геодезическая привязка геодинамических станций и станций, предназначенных для слежений и орбитальных определений спутников. Важную цель также представляло объединение и координирование сил для создания инструментального парка и, в случае необходимости, для производства разработок по параметрам возможных допплеровских спутников.

По линии Геодезических Служб социалистических стран /ГССС/ допплеровское сотрудничество началось в 1983 году. Цель запланированных работ состояла в постороении допплеровской сети на главных пунктах существующей совместной единой астрономо-геодезической сети для ее контроля и повышения точности /как это уже указывалось в разделе 3.3./.

Кроме международного сотрудничества по программе Интеркосмос и в рамках ГССС успешно выполняются и национальные допплеровские работы в геодезических сетях НРБ, ВНР, ГДР, ПНР и СССР.

4.2. Участники сотрудничества

В сотрудничестве по допплеровским работам в рамках Интеркосмос и ГССС принимают участие НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СССР и ЧССР. Координатором этих работ является Обсерватория Космической Геодезии, ВНР. В странах: Вьетнам, Корея, Куба, МНР и СРР допплеровские работы или не ведутся вообще, или же только на основе взаимопомощи.

В странах-участницах свой вклад в работу вносят множество различных организаций. Среди них определяющую роль играют:

- НРБ - Геодезическая Служба НРБ и Центральная лаборатория высшей геодезии АН НРБ /ЦЛВГ, ст. Плана/,
- ВНР - Обсерватория космической геодезии при Институте геодезии, картографии и дистанционного зондирования Геодезической Службы ВНР /ОКГ, ст, Пенц/,
- ГДР - Центральный институт физики Земли АН ГДР /ЦИФЗ, ст. Потсдам/ и Геодезическая Служба ГДР,
- ПНР - Астрономическая обсерватория Центра космических исследований АН ПНР /АО, ст. Боровец/ и ГЕОКАРТА,
- СССР-Геодезическая Служба СССР и Астрономический Совет АН СССР,
- ЧССР-Астрономический институт АН ЧССР /АИ, ст. Ондрейов/.

В сотрудничестве наблюдается двойственность. С одной стороны, по программе Интеркосмос требуется и строится научная сеть, открытая и независимая от государственных сетей. Она необходима для решения задач международных космических исследований открытого типа, для геодинамических исследований и для создания сетей слежения спутников.

С другой стороны, Геодезические Службы социалистических стран строят и поддерживают оперативную сеть высокой точности, которая однако является недоступной для научных целей программы Интеркосмос. Несмотря на то, что научная и оперативная сети имеют как общую цель, так и совместные задачи, они все же не связаны друг с другом. Для достижения

научного прогресса в нашей области с целью повышения эффективности геодезического производства и в интересах выполнения требований все расширяющейся и возрастающей космической промышленности предлагается найти разумный путь совместного использования научной и оперативной сетей и в социалистических странах.

4.3. Инструментальный парк

Совместная деятельность до настоящего времени осуществлялась прежде всего путем применения подходящих для системы Транзит приемников западного и, в менее значительной степени, польского производства.

Все коммерческие типы приемников западного производства используются в нашем сотрудничестве, а именно: JMR-1, -1A, -4A и MX-1502 производства США, а также CMA-722B, -751 и CMA-761 канадского производства.

В первой половине 80-х годов Центр космических исследований АН ПНР и польский Институт навигации разработали и приступили к изготовлению приемников DOG-2 и DOG-3 /см. [5]/. В настоящее время выпускается компактный приемник геодезической точности DOG-3. Он работает наподобие CMA-722B.

Фирма ВИДЕОТОН в Венгрии разработала и с 1987 года выпускает навигационный и геодезический приемник типа SNS-11. Этот компактный приемник аналогичен приемнику MX-1502 и имеет вычислительное машинное обеспечение высокой степени.

В работах, проводимых социалистическими странами, до настоящего времени были вовлечены следующие приемники:

- НРБ - 1 комп. CMA-761 и 2 комп. MX-1502,
- ВНР - 3 комп. JMR-1A и 1 комп. CMA-751,
- ГДР - 2 комп. JMR-4A,
- ПНР - 2 комп. JMR-4A, 1 комп. DOG-2 и 2 комп. DOG-3,
- СССР - 1 комп. CMA-722B, 3 комп. CMA-761, 1 комп. MX-1502 и 1 комп.DOG -3,
- ЧССР - 1 комп. DOG-3.

Из вышеперечисленных 21 приемника 10 комплектами располагают организации, непосредственно заинтересованные в работах по программе Интеркосмос, остальные же имеются в распоряжении геодезических организаций.

Отметим тут же, что в последние годы польские и советские коллеги подготовили проекты и некоторые разработки по системе наземного приемного устройства и бортового оборудования, подходящего для планируемого спутника ГЕО-ИК /см. [4]/.

4.4. Программное обеспечение

Для определения координат одиночных наземных пунктов у всех вышеуказанных приемников имеются вычислительные программы, работающие на встроенном микропроцессоре или на больших или персональных компьютерах. Они служат для контроля и вычисления предварительных координат, но не подходят для точных относительных определений. Для относительных определений применяются транслокационные или мультилокационные программы, описанные ниже.

Приемники JMR-4A, MX-1502, сма-761 и DOG-3 обеспечены встроенными транслокационными вычислительными программами для 2-ух или 4-ех станций.

Для сетевого применения и международного сотрудничества наиболее мощными и ценными программами являются мультилокационные программы, способные обработать одновременные допплеровские наблюдения 10 или более станций. В рамках Интеркосмос имеются следующие: POTSDAM-5, SADOSA-5 и видоизменения программы GEODOP.

Орбитальная программа POTSDAM-5 разработана сотрудниками ЦИФЗ в ГДР. Она служит для решения широкого круга задач спутниковой геодезии, в том числе и для мультилокационной обработки допплеровских наблюдений методом короткой дуги /см. [20]/. Она также способна принимать первично фильтрованные наблюдения от всех допплеровских приемников.

Программа SADOSA-5 разработана в ОКГ /Пенц, Венгрия/

/см. [6]/. Она служит для мультилокационной обработки методом короткой дуги. Допплеровские наблюдения принимаются от всех видов приемников. Число уравниваемых станций в стандартном режиме составляет 30, однако его можно увеличить в зависмости от памятной мощности машины.

В Польше имеется мультилокационная программа, приспособленная для приемника DOG-3. В СССР и НРБ успешно ведутся разработки по созданию мультилокационных программ.

Важным результатом сотрудничества явилось создание единого формата входных допплеровских данных. Созданы вычислительные программы для определения параметров трансформации между различными сетями и наборами координат. Далее, разрабатываются программы для интеграции наземных и допплеровских сетей.

4.5. Результаты методических разработок

По геодезическому использованию допплеровских габлюдений в НРБ, ВНР, ГДР, ПНР, СССР и ЧССР проделан ряд теоретических и симуляционных исследований. В этом плане образцовым можно назвать сотрудничество между специалистами ОКГ ВНР и ЦИФЗ ГДР.

4.5.1. Интерферометрическая технология

При обычной допплеровской обработке максимальной точнотсью относительных положений является ± 20-30 см при наблюдениях длительностью 15-30 суток. Для повышения точности и уменьшения времени наблюдений специалисты ОКГ предложили интерферометрическую технологию проведения и обработки допплеровских наблюдений /см. [7]/. Разработана и программа обработки, названная PENCDIP. Методом, получившим название DBLI проводились экспериментальные наблюдения на коротких базисах ст. Пенц, на длинных базисах Пенц-Байя, Пенц-Грац и, в сотрудничестве между ВНР и ГДР, по четырехугольнику Пенц-Потсдам-Берлин-Байя. Эти работы и их результаты опуб-

ликованы в ряде изданий, в том числе и в [8], [9], [10] и [20].

Результаты показывают, что длину 10-200 км базисов можно определить с точностью ± 10-15 см по наблюдениям длительностью в полдня.

4.5.2. Калибровочные методы

При обработке важно знать точность /достоверность/ допплеровских наблюдений для вешевания и задержку приемников относительно друг друга. Для проверки качества приемников разработан и используется на практике метод взаимных допплеровских чисел /см. [11] и [12]/. Интересные практические результаты определения дифференциальной задержки приемников приведены в [10], [13] и [17].

4.5.3. Фотодопплер

По дистанционным фотографическим наблюдениям спутников Транзит можно определить координаты станции. Для этой цели необходимо знать точную орбиту наблюдаемого спутника, которая определяется по бортовым эфемеридам, зарегистрированным приемником.

Этот метод, получивший название Фотодопплер, позволил получить высокую точность и используется преимущественно для получения координат фотокамерных станций, располагающих наблюдательными станциями более высокой точности, а также для вывода некоторых систематических ошибок и внешней точности фотокамер.

В рамках программы Интеркосмос и Геодезических Служб под координацией ОКГ ВНР с 1981 по 1986 гг. проводились сеансы Фотодопплер. В результате этого точно определены геоцентрические координаты фотографических камер на станциях Рига, Ужгород, Пенц и Звенигород /табл.1/. Определены также и систематическая ошибка и внешняя точность камер указанных станций и станций Симеиз, Бухарест, Хелуан, Плана, Стара-Загора и Ольштын. Детальное описание метода и результа-

тов дано в [22] и [23].

4.6. Сеансы допплеровских наблюдений, их результаты

До сих пор проводились и ведутся и в настоящее время позиционные определения одиночных станций, пар станций и сетей: регулярные наблюдения в обсерваториях, калибровочные сеансы, WEDOC-1, WEDOC-2, MERITDOC, IKDOK, GSSC-DOC84, национальные допплеровские работы, DÖDOC, FHDOC, ALGEDOP.

4.6.1. Регулярные наблюдения

В обсерваториях Боровец /ПНР/, Пенц /ВНР/ и отчасти Потсдам /ГДР/ допплеровские наблюдения ведутся регулярно /см. [5], [15] и [20]/.

На референцном пункте станции Пенц непрерывные наблюдения ведутся с 1978 года по настоящее время /1987 г./. Координаты пункта вычислялись по кассетам /одна кассета содержит 30-40 прохождений, полученных за 3 дня/. Полученная большая серия координат обработана спектральным анализом. Были обнаружены значительные периодические изменения координат /см. [15]/. Эти результаты полезно используются для исследования изменений системы координат, определяемой по бортовым эфемеридам для коррекции допплеровских координат других станций за эпоху /см. [14]/.

4.6.2. Калибровка приемников

Перед наблюдательными сеансами и после них на ст. Пенц были организованы следующие калибровки приемников / DCCP = Doppler Calibration Campaign Penc/:

DCCP1 - май 1982 г.,5 приемников стран-участниц программы Интеркосмос, участвующих в WEDOC-1 /см. [16] и [17]/,

DCCP2 - сентябрь 1983 г., 9 приемников стран ИК, участвующих в WEDOC-2 /см. [21]/,

DCCP3 - май 1984 г., 11 приемников стран ГССС,
DCCP4 - апрель 1987 г., 12 приемников стран ГССС.

Кроме перечисленных выше калибровок были организованы и региональные калибровки в НРБ, ПНР и СССР.

4.6.3. Западный и Восточный Европейский Сеанс Допплеровских Наблюдений

С целью геодезической привязки действующих и запланированных геодинамических и лазерных станций и создания единой геодинамической-геодезической системы для проведения совместных геодинамических исследований на территории Западной и Восточной Европы были организованы сеансы WEDOC-1 и WEDOC-2 /см. рис.2./

Координаторами сеансов являлись Институт космических исследований АН Австрии, Грац, ответственный за западные станции, и Обсерватория космической геодезии ВНР, Пенц, ответственная за станции программы Интеркосмос.

Сеанс WEDOC-1 был успешно проведен с 17 по 27 мая 1980 года с участием 15 станций. Наблюдения обрабатывались в Граце /см. [18]/, Франкфурте, Пенце /см.[19]/ и Потсдаме /см.[20]/. В таблице 2 представлены координаты, полученные в результате первой версии программы SADOSA.

Учитывая опыт, преобретенный в ходе WEDOC-1, сеанс WEDOC-2 было проведен более успешно и расширенно с 6 по 16 сентября 1983 г.

В сеансе WEDOC-2 наблюдения велись на 27 станциях, расположенных на территории, диаметр которой составлял около 3000 км. 18 станций работали в Западной Европе, а 9 - в Восточной. Сбор результатов наблюдений и распределение их в соответствии с запросами проводились на станциях Пенц и Грац. Наблюдения обрабатывались с помощью программ SADOSA-5 и GEODOP-V. Результаты вычислений сравнивались с наборами координат, полученными в других допплеровских и наземных сетях.

Цель и организация WEDOC-2, полевые работы, сбор и обработка результатов наблюдений, методы обработки, результаты вычислений, сравнения и выводы подробно описаны в монографии [21]. Там же приведены полученные пространственные координаты, их точностные характеристики и кореляционные матрицы, метод и результаты семипараметровой пространственной трансформации и детальное описание наблюдательных станций.

Координаты мультилокационного сетевого уравнивания, полученные методом короткой дуги программы SADOSA-5, а также их средняя квадратическая ошибка даются в табл. 3. Координаты относятся к фазовому центру антенны приемников. Координаты и соответствующие средние квадратические ошибки для каждой станции были получены в системе координат бортовых эфемерид спутников, однозначно определяемой с помощью полной совокупности используемых в уравнивании орбит. Обобщенная таким образом система координат является одним из возможных осуществлений системы координат NWL-10D.Точность этого осуществления составляет ± 2-3м /Отметим, что система NWL-10D принята в мировой геодезической практике как одна из наиболее точных по своей внутренней сходимости всеобщих наземных геоцентрических систем координат, и она используется для допплеровских целей спутниковой геодезии. Именно поэтому система NWL-10D может быть принята за эталон./ Точность пунктов WEDOC-2 относительно друг друга составляет ± 0.3 - 0.5 м.

Два набора геоцентрических координат, полученных двумя программами SADOSA-5 и GEODOP-V были сравнены между собой с помощью семипараметровой пространственной триангуляции. Они подобны друг другу со средней квадратической точностью трансформации, составляющей ± 0.6 м.

Сеть WEDOC-2 имеет и такие пункты, которые являются совместными с некоторыми пунктами сетей WEDOC-1 , EROSDOC и ED-79 . По этим пунктам наборы координат WEDOC-2, полученные с помощью программ SADOSA-5 и GEODOP-V сравниваемы с

другими независимыми наборами упомянутых сетей. В результате получены средние квадратические ошибки $б_o$ семипараметровых трансформаций. Они приведены в табл.4. Напомним, что WEDOC-1 и WEDOC-2 получены по бортовым эфемеридам /BE/, EROSDOC является европейской допплеровской сетью, вычисленной по точным /прецизионным/ эфемеридам /PE/, а ED-79 является сетью западно-европейских пунктов, определяемой по наземным измерениям и формирующей знаменитую систему координат.

4.6.4. MERITDOC

В рамках научной международной мировой программы MERIT в период апрель-июнь 1984 г. успешно завершился интенсивный допплеровский сеанс MERITDOC . Цель заключалась в определении совместной однородной референцной системы для различных техник наблюдений по космической геодезии. В этом сеансе успешно участвовали станции Боровец, Пенц и Потсдам. Координаты этих станций совместно с другими станциями получены с высокой точностью в мировой системе.

4.6.5. Европейские сеансы с участием открытых научных станций Интеркосмос

В 1978-м году по инициативе Австрии и ФРГ был организован совместный допплеровский сеанс DÖDOC , в котором с успехом приняла участие Интеркосмосовская станция Боровец /ПНР/. Так называемый дополнительный DÖDOC был проведен в 1979 г. с участием станции Пенц /BHP/.

С 1983 по 1985 гг. с участием Италии, Австрии и ФРГ был организован научный сеанс ALGEDOP для более точного определения высот геоида в регионе Альпийских гор. В этой программе со стороны BHP и ПНР была оказана помощь путем проведения допплеровских наблюдений на пунктах Австрии.

В рамках научного сотрудничества в 1983 году на геодезических пунктах Финляндии проводился совместный финско-венгерский сеанс допплеровских наблюдений FHDOC. Мультилокаци-

онным методом /см.[24]/ было определено всего 9 пунктов финской геодезической сети.

4.6.6. ИКДОК

Для научных целей глобального характера в рамках программы Интеркосмос планируется провести мировой допплеровский наблюдательный сеанс ИКДОК. Наблюдения планируется провести в два подсеанса: с 1 по 15 декабря 1987 года и с 16 по 30 января 1988 года. В соответствии с планом в этом сеансе предполагается участие 16 станций, распределенных по всему миру: Бамако, Бангалур, Боровец, Звенигород, Кинг Джердж, Мапуто, Новолазаревская, Нячанг, Ондржейов, Плана, Пенц, Потсдам, Сантьяго де Куба, Симеиз, Улан-Батор и Хелуан.

4.6.7. Допплеровские программы ГССС

С целью контроля, повышения точности и привязки к мировой системе координат на главных пунктах единой астрономо-геодезической сети Геодезических Служб социалистических стран происходит построение совместной допплеровской сети в два этапа: в 1984 году сеанс GSSC-DOC84 и в 1987 году сеанс GSSC-DOC87были успешно завершены. В настоящее время ведутся вычисления и применение к наземной единой астрономо-геодезической сети европейских ГССС. Это мероприятие представляет собой важное научно-техническое достижение, открывающее путь к практическому использованию спутниковой геодезии в производстве наших стран.

5.Перспективы допплеровского метода и спутниковой геодезии

В настоящее время и в социалистических странах преобретен опыт и имеется достаточное количество наземных приемников. С другой стороны система спутников Транзит работает до 1992-95 гг. Исходя из этого в последующие 1-3 года целесообразно:

- завершить национальные допплеровские наблюдения,
- завершить вычисления сеансов GSSC-DOC84 и GSSC-DOC87 и использовать результаты для повышения точности совместной геодезической сети ГССС и для ее привязки к существующим в мире системам координат, а также для получения улучшенной картины геоида и трехразмерной неразрывной сети в регионе ГССС,
- завершить наблюдения и вычисления по глобальной программе ИКДОК и использовать результаты ИКДОК и WEDOC для научных и производственных целей геодезии, геодинамики, орбитальных определений и космического исследования как открытого, так и оперативного типа /в том числе и для ГССС/.

Прогрессивным мероприятием в геодезической практике является внедрение нового метода Глобальной позиционной системы /ГПС или GPS /. С помощью системы спутников НАВСТАР, поддерживаемой США, спутниковая геодезия стала повседневным средством геодезического производства на дистанциях от 1 до 500-1000 км. При этом метод ГПС на 1-2 порядка точнее и быстрее наземных геодезических измерений и допплеровских наблюдений /точности различных геодезических методов относительных определений сравниваются на рис.3/. Наряду с американской системой НАВСТАР существует и советская система ГЛОНАСС, которая, к сожалению, пока еще не является доступной для геодезистов.

В связи с прогрессом ГПС геодезистам социалистических стран целесообразно:
- в будущем приостановить закупку допплеровских приемников,
- отдать преимущество финансовым вложениям в целях закупок и разработок приемников ГПС, подходящих для системы НАВСТАР и/или ГЛОНАСС,
- найти доступ к системе спутников ГЛОНАСС,
- на основании пунктов и сетей, определяемых допплеровским методом /таких как WEDOC, ИКДОК, GSSC-DOC84 , GSSC-DOC87

и национальные определения/ и отчасти, посредством международного сотрудничества, создавать региональные, континентальные или даже глобальные сети слежения по ГПС с целью точноного определения части орбиты /или полной орбиты/ спутников системы НАВСТАР и ГЛОНАСС, что необходимо для точных относительных местоопределений различных масштабов,

- организовать достаточно густую национальную служебную сеть пунктов, регулярно наблюдающих ГПС с целью получения постоянных пунктов на одном конце тех многочисленных базисов, на другом конце которых проводятся ГПС наблюдения, используемые для точных относительных определений в повседневном геодезическом производстве.

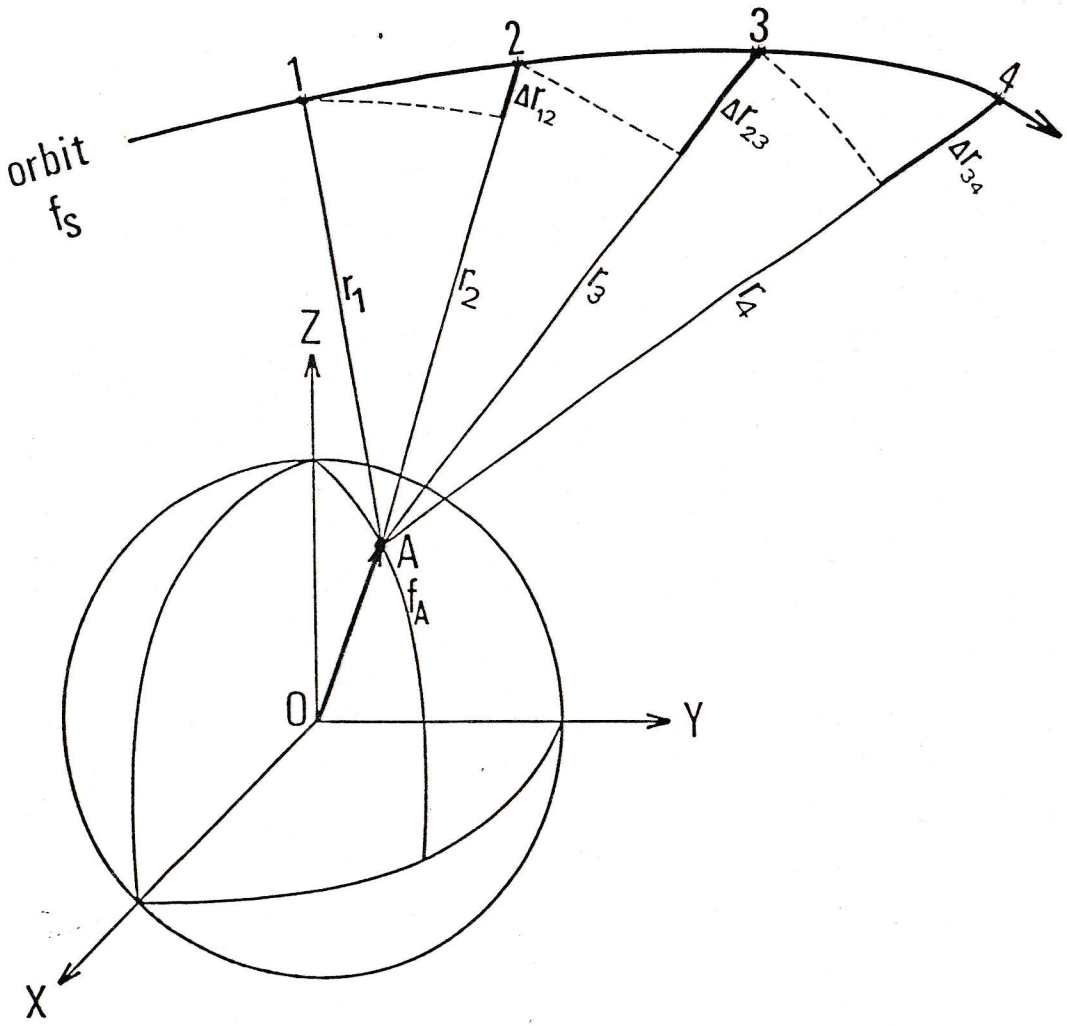
orbit
f_S
1
2
3
4
Δr_{12}
Δr_{23}
Δr_{34}
r_1
r_2
r_3
r_4
Z
A
f_A
O
Y
X

Рис. 1.

Станции WEDOC-1 и WEDOC-2

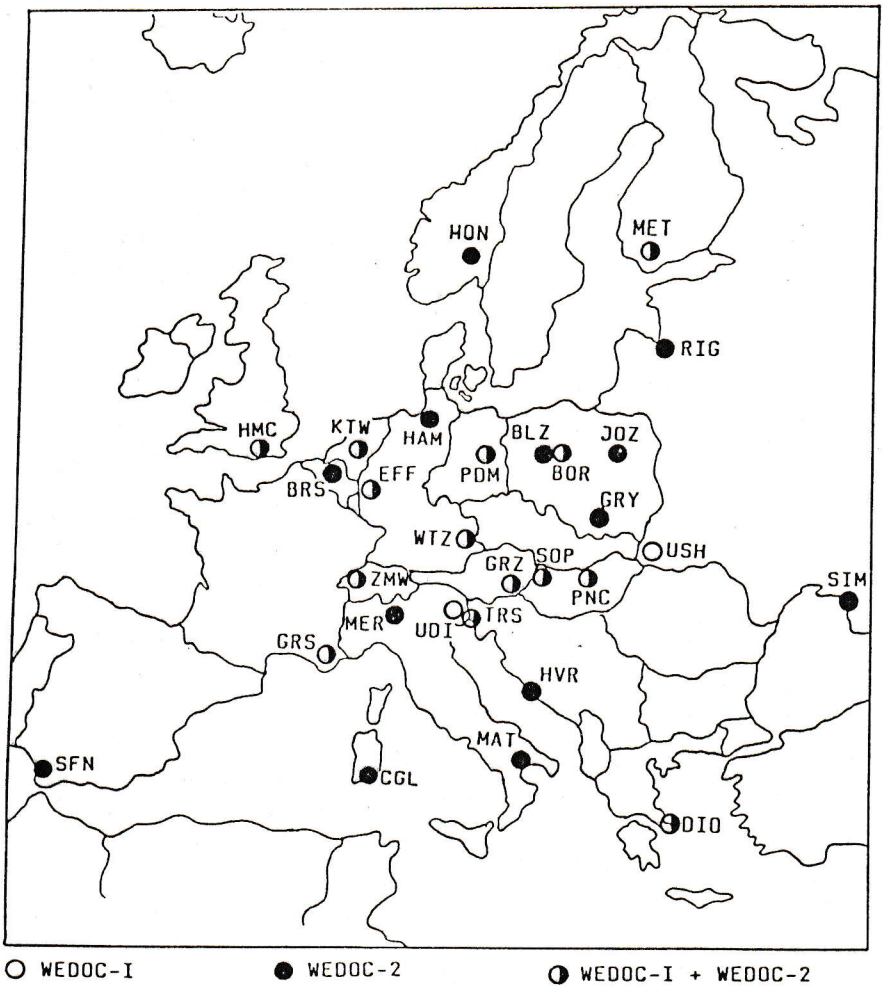

Рис. 2.

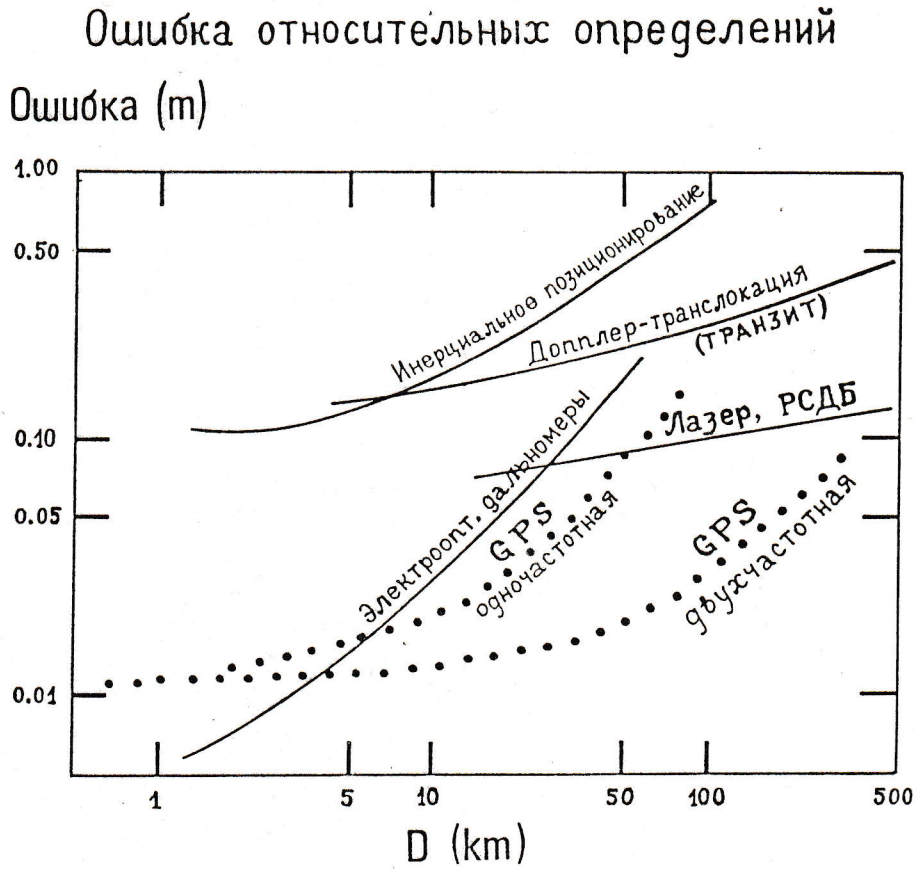
Ошибка относительных определений
Ошибка (m)
1.00
0.50
0.10
0.05
0.01
Инерциальное позиционирование
Допплер-транслокация
(ТРАНЗИТ)
Лазер, РСДБ
Электроопт. дальномеры
GPS
одночастотная
GPS
двухчастотная
1
5
10
50
100
500
D (km)

Рис. 3.

Геоцентрические координаты центра фотокамер по методу фотодопплер

Таблица 1

Станция	X(m)		Y(m)		Z(m)		Пр/Нап
Рига(1984, Nova)	3183983.8	± 1.4	1421486.4	± 1.4	5322806.4	± 1.8	13/408
Ужгород /1985/	3907414.9	±19.9	1602461.1	±15.5	4763913.6	± 7.4	2/28
Звенигород /1984/	2886278.2	± 4.8	2155999.5	± 3.8	5245877.6	± 7.1	5/10
Пенц /1979/	4052380.1	± 6.1	1417599.6	± 6.3	4701527.8	± 7.7	1/15

Пр/ Нап - Число отнаблюденных прохождений и фотографических направлений

WEDOC-1: Геоцентрические координаты фазового центра антенн, полученные программой SADOSA

Таблица 2

Станция	Код	X(m)	Y(m)	Z(m)
Borowiec	BDR	3738379.93	1148145.99	5021805.57
Dionysos	DIO	4595237.36	2139411.09	3912611.04
Effelsberg	EFF	4029176.48	490745.13	4904003.20
Grasse	GRS	4588041.20	556429.05	4381658.35
Graz	GRZ	4194433.23	1162687.88	4647240.54
Herstmonceux	HMC	4033658.69	23566.51	4924145.61
Kootwijk	KTW	3899224.10	396752.68	5015068.14
Penc (005)	PNC	4052371.10	1417517.53	4701523.96
Potsdam	PDM	3800703.14	882040.39	5028784.77
Sopron	SOP	4123990.14	1226072.49	4693243.21
Triest	TRS	4336755.78	1071249.90	4537898.36
Udine	UDI	4315501.20	1014998.31	4570388.22
Ushgorod	USH	3907439.25	1602427.03	4763899.61
Wettzell	WTZ	4075541.50	931807.11	4801603.75
Zimmerwald	ZMW	4331298.46	567532.82	4633130.65

1/ Эксцентрическое положение станций WEDOC-1 относительно WEDOC-2 имеются в публикации [21]

2/ Станция Ужгород вычислялась программой одиночного позиционного определения. Она не вошла в мультилокационное сетевое вычисление.

WEDOC-2: Геоцентрические координаты фазового центра антенн, полученные программой SADOSA5

Таблица 3

Станция	Код	Приемник	X /m/		Y /m/		Z /m/	
BLAZAJEWKO	BLZ	JMR-4A	3744067.46	±.29	1152655.79	±.23	5016556.17	±.24
BOROWIEC	BOR	DOG 2	3738368.96	±.30	1148157.85	±.24	5021815.86	±.25
BRUSSELS	BRS	TRANET-B	4027872.43	±.30	307011.81	±.28	4919511.43	±.26
CAGLIARI	CGL	MX-1502	4893400.53	±.36	772651.14	±.43	4004164.07	±.31
DIONYSOS	DIO	MX-1502	4595226.14	±.30	2039458.82	±.25	3912611.92	±.25
EFFELSBERG	EFE	MX-1502	4029176.82	±.29	490744.50	±.24	4904005.83	±.24
GRASSE	GRS	JMR-1A	4588039.36	±.30	556428.69	±.28	4381662.84	±.25
GRAZ	GRZ	CMA-722B	4194432.58	±.29	1162686.61	±.23	4647243.35	±.24
GRYBOV	GRY	JMR-4A	3866021.59	±.29	1480016.26	±.23	4836496.57	±.24
HAMBURG	HAM	MX-702A	-		-		-	
HERSTMONCEUX	HMC	MX-1502	4033659.33	±.29	23566.96	±.25	4924148.57	±.25
HONEFOSS	HON	CMA-751	3132543.69	±.28	566389.90	±.23	5508610.88	±.23
HVAR	HVR	MS-1502	4468040.29	±.29	1319142.23	±.25	4342087.63	±.25
JOZEFOSLAV	JOZ	JMR-4A	3664944.26	±.29	1409121.71	±.23	5009580.06	±.24
KOOTWIJK	KTV	CMA-761	3899224.08	±.29	396751.78	±.25	5015070.63	±.24
MATERA	MAT	MX-1502	4641969.65	±.30	1393037.00	±.27	4133267.81	±.26
MERATE	MER	MX-1502	4401788.24	±.29	730942.93	±.25	4542759.86	±.25
METSAHOVI	MET	JMR-4A	2892587.52	±.30	1311784.79	±.27	5512613.62	±.25
PENC	PNC	JMR-1A	4052456.36	±.29	1417626.13	±.23	4701409.68	±.24
POTSDAM	PDM	JMR-1A	3800703.53	±.29	882038.36	±.24	5028787.09	±.24
RIGA	RIG	CMA-722B	3183912.97	±.29	1421449.04	±.25	5322806.76	±.24
SAN FERNANDO	SFN	TRANET-2	5105462.58	±.36	-555146.19	±.51	3769893.51	±.34
SIMEIZ	SIM	MX-1502	3783883.49	±.33	2551465.06	±.30	4441267.30	±.26
SOPRON	SOP	CMA-751	4123989.50	±.30	1226070.78	±.27	4693246.13	±.26
TRIESTE	TRS	MX-1502	4336754.90	±.31	1071248.33	±.30	4537901.68	±.26
WETTZELL	WTZ	CMA-722B	4075541.03	±.29	931805.54	±.24	4801606.37	±.24
ZIMMERWALD	ZMW	MX-1502	4331297.97	±.29	567531.87	±.23	4633133.56	±.24

Сравнение геоцентрических координат WEDOC-2 с решением других сетей

Таблица 4

Сравниваемые решения	WEDOC-2			
	SADOSA-5 (BE)		GEODOP-V (BE)	
	Число совместных пунктов	$б_o$ /м/	Число совместных пунктов	$б_o$ /м/
WEDOC-2				
SADOSA-5 (BE)	-	-	25	±0.62
WEDOC-1				
SADOSA (BE)	13	±0.63	-	-
GEODOP-III (BE)	-	-	13	±0.57
EROSDOC (PE)	6	±0.57	6	±0.52
ED-79	11	±0.75	11	±0.89

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Адам,Й.-Фейеш,И.-Гшвиндт,А.-Вальх,Э.: Докладная записка о возможностях применения допплеровского метода в социалистических странах. Предложение на заседании Секции 6, Космическая Физика ИК, 1976, Веймар.

2. Адам,Й.-Вальх,Э.: Использование допплеровских измерений в области геодезии и геодинамики. Предложение по запросу Секции 6, Космическая Физика ИК, 1977, Будапешт.

3. Протокол заседания Бюро Секции 6, Космическая Физика ИК, 1978, Ольштын.

4. Казьмерский,А.-Латка,Я.-Марковски,Я.: Двухканальная допплеровская система для определения положения спутников "Интеркосмос". Наблюдения ИСЗ, № 21,т.2, 1984, Москва.

5. Франчик,П.-Якшь,В.: Результаты наблюдения допплеровским приемником ДОГ-2. Наблюдения ИСЗ, № 23, 1984, Прага

6. Mihály,Sz.: SADOSA Program System /I. Mathematical Descpription, II. Programming Documentation,III. Operator's Manual/. Hungarian Geodetic Survey /Institute of Geodesy,Cartografy and Remote Sensing/ Satellite Geodetic Observatory, Budapest,1985.

7. Фейеш,И.-Михай,С.: Предложение использовать допплеровские приемники как терминалы РСДБ. Наблюдения ИСЗ, №20, 1982,/Албена/, София.

8. Mihály,Sz.-Borza,T.-Fejes,I.: Interferometric Processing of NNSS Doppler Observations. Proceedings of the First International Symposium on Precise Positioning with the GPS, Vol.II. pp.495-508, Rockville, Maryland, USA, 1985.

9. Borza,T.-Fejes,I.-Mihály,Sz.-Dietrich,R.-Gendt,G.-Lehmann,K.: The Doppler Baseline Interferometry Experiment. Acta Geodaet. Geophys. et Montanist., Acad. Sci. Hung., Budapest /in press/. 1988 Volume 23, 2-4. szám pp. 205-216.

10. Дитрих,Р.-Леманн,К.: Интерферометрический анализ допплеровских измерений для дифференциальной калибровки приемника. Наблюдения ИСЗ, №23, 1984, Прага.

11. Фейеш,И.: Метод взаимных допплеровских чисел для сравнения качества приемников. Наблюдения ИСЗ, №21, т.2, 1984, Москва.

12. Фейеш,И.-Лохмар,Й.: Оценка точности допплеровских приемников. Наблюдения ИСЗ, №23, 1984, Прага.

13. Дитрих,Р.-Нойберт,Р.-Фейеш,И.: Определение дифференциальной задержки двух допплеровских приемников. Наблюдения ИСЗ, №21, т.2, 1984, Москва.

14. Алмар,И.-Адам,Й.: Роль геодинамической обсерватории в геодезической сети. Наблюдения ИСЗ, №21, т.2, 1984, Москва.

15. Ádám,J.: A Least Squares Spectral Analysis of the Doppler Coordinate Time Series Obtained at the Satellite Geodetic Observatory, Station Penc, Hungary. Proceedings of the Int. Symp. on Space Techniques for geodynamcs, Vol.2., pp. 243-252. Sopron, 1984.

16. Михай,С.-Адам,Й.-Баняи,Л.-Фейеш,И.-Варга,М.-Лехманн,К.-Рауш,Э.-Булыгина,О.-Филиков,С.-Зубинский,В.: Допплеровский калибровочный сеанс Пенц. Наблюдения ИСЗ, №21, т.2, 1984, Москва.

17. Баняи,Л.: Калибровка допплеровских приемников. Наблюдения ИСЗ, №23, 1984, Прага.

18. Rinner, K. - Pesec, P.: West-East European Doppler Observation Campaign. Manuscripta Geodaetica, Vol. 7. /1982/, pp.117-132.

19. Mihály, Sz.: A SADOSA processing of the WEDOC observations /in Hungarian/. GEODINFORM, XII.évf.1-2.sz., Budapest, 1982.

20. Дитрих,Р.: Исследования Центрального Института Физики Земли в Потсдаме /ГДР/ в области допплеровской геодезии. Наблюдения ИСЗ, №23, 1984, Прага.

21. Pesec, H.-Rinner, K. - Mihály, Sz. - Alpár, Gy.: West-East European Doppler Observation Campaign WEDOC-2. - Final Results. Monography. FÖMI "Tudományos Közlemények", 1985. November, Budapest.

22. Борза,Т.-: Определение координат станций Рига и Звенигород методом Фотодопплер. Наблюдения ИСЗ, №21, т.2, 1984, Москва.

23. Борза,Т.-Дородницына,О.А.: Результаты метода Фотодопплер с использованием спутника типа Нова. Наблюдения ИСЗ, №23, 1984, Прага.

24. Czobor, A. - Adam, J. - Mihaly, Sz. - Parm, T. - Ollikainen, M.: Results of the Finnish-Hungarian Doppler Observation Campaign /FHDOC/. Reports of the Finnish Geodetic Institute, No.87:1, Helsinki, 1987.

/Д-р Михай Сабольч/
Будапешт,20октября 1987 г.