

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

ХОДА Олег Александрович

УДК 528.2:629.78+550.388.2

**НАБЛЮДЕНИЯ СПУТНИКОВ ГЛОБАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ (GPS) ДЛЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ И
ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В УКРАИНЕ**

Специальность 01.03.01 — астрометрия и небесная механика

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата физико–математических наук

Научный руководитель

Яцкив Ярослав Степанович

доктор физико–математических наук

академик НАН Украины

Киев — 2000

ОГЛАВЛЕНИЕ

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ	4
ВВЕДЕНИЕ	7
ГЛАВА 1. ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ	
МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ (GPS): ОБЗОР	13
1.1. История создания GPS	13
1.2. Структура GPS	14
1.2.1. Космический сегмент	15
1.2.2. Контрольный сегмент	22
1.2.3. Сегмент пользователей	23
1.3. Структура сигнала	25
1.4. Уравнения наблюдений	26
1.4.1. Общие положения	26
1.4.2. Кодовые псевдодальности	27
1.4.3. Фазовые псевдодальности	29
1.4.4. Линейные комбинации	30
1.5. Основные источники ошибок	33
1.5.1. Типы ошибок	33
1.5.2. Ошибки, привносимые спутником	34
1.5.3. Ошибки, обусловленные средой распространения сигнала ...	35
1.5.4. Ошибки, привносимые приемником	38
1.6. Международная геодинимическая GPS–служба (IGS)	39
1.6.1. История создания IGS	39
1.6.2. Структура IGS	39
1.6.3. Продукты IGS	43
ГЛАВА 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS–ТЕХНОЛОГИИ	
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ	
ГЕОДИНАМИКИ	45

2.1. Создание перманентной GPS–сети в Украине как региональной части IGS	45
2.2. Проведение GPS–наблюдений на Крымском геодинимическом полигоне и анализ их результатов	48
2.2.1. Описание полигона	48
2.2.2. GPS–кампания РЕКА–93	52
2.2.3. GPS–кампания РЕКА–94	53
2.3. Проведение GPS–наблюдений в рамках проекта GEODUC и анализ их результатов	65
2.3.1. Карпатский геодинимический полигон	65
2.3.2. GPS–кампания GEODUC'93	67
2.3.3. GPS–кампания GEODUC'95	71
2.4. Локальный полигон ГАО НАН Украины	77
2.5. Выводы	84
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ GPS–ТЕХНОЛОГИИ	86
3.1. Ионосфера: состав, модели	86
3.2. Влияние ионосферы на распространение радиосигнала	90
3.3. Кlio: программа определения параметров ионосферы из GPS–наблюдений	95
3.3.1. Обзор программы Кlio	95
3.3.2. Блок проверки качества данных и поиска скачков фаз	95
3.3.3. Блок оценки параметров ионосферы	98
3.3.4. Тестовые результаты	102
3.4. Выводы	115
ВЫВОДЫ	116
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	118

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГАО	<u>Г</u> лавная <u>а</u> строномическая <u>о</u> бсерватория
ГЛОНАСС	<u>Г</u> лобальная <u>н</u> авигационная <u>с</u> путниковая <u>с</u> истема
ДУ "ЛП"	<u>Д</u> ержавний <u>у</u> ніверситет " <u>Л</u> ьвівська <u>п</u> олітехніка"
ИГФ	<u>И</u> нститут <u>г</u> еофизики НАН Украины им. С.И.Субботина
ИПА	<u>И</u> нститут <u>п</u> рикладной <u>а</u> строномии
ИСЗ	<u>И</u> скусственный <u>с</u> путник <u>З</u> емли
ЛЛС	<u>Л</u> азерная <u>л</u> окация искусственных <u>с</u> путников Земли
ЛПИ	<u>Л</u> ьвовский <u>п</u> олитехнический <u>и</u> нститут (теперь ДУ "ЛП")
МТКК	<u>М</u> ногоразовый <u>т</u> ранспортный <u>к</u> осмический <u>к</u> орабль
НАН	<u>Н</u> ациональная <u>а</u> кадемия <u>н</u> аук
НИИ	<u>Н</u> аучно– <u>и</u> сследовательский <u>и</u> нститут
ПАН	<u>П</u> ольская <u>а</u> кадемия <u>н</u> аук
ПВЗ	<u>П</u> араметры <u>в</u> ращения <u>З</u> емли
РАН	<u>Р</u> оссийская <u>а</u> кадемия <u>н</u> аук
РН	<u>Р</u> акета– <u>н</u> оситель
РСДБ	<u>Р</u> адиоинтерферометрия со <u>с</u> верхдлинной <u>б</u> азой
РТ	<u>Р</u> адиотелескоп
СКО	<u>С</u> реднее <u>к</u> вадратичное <u>о</u> тклонение
с/о	<u>С</u> истема <u>о</u> тсчета
УжГУ	<u>У</u> жгородский <u>г</u> осударственный <u>у</u> ниверситет
УкрАГП	<u>У</u> країнське <u>а</u> ерогеодезичне <u>п</u> ідприємство (теперь УкрДАГП)
УкрДАГП	<u>У</u> країнське <u>д</u> ержавне <u>а</u> ерогеодезичне <u>п</u> ідприємство
УкрЦСМ	<u>У</u> краинский <u>ц</u> ентр <u>с</u> тандартизации, <u>м</u> етрологии и сертификации
A–S	<u>A</u> nti– <u>s</u> poofing
AUSLIG	<u>A</u> ustralian <u>S</u> urveying and <u>L</u> and <u>I</u> nformation <u>G</u> roup
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie

CEGRN	<u>C</u> entral <u>E</u> uropean <u>G</u> PS <u>R</u> eference <u>N</u> etwork
CDDIS	<u>C</u> rustal <u>D</u> ynamic <u>D</u> ata <u>I</u> nformation <u>S</u> ystem
CDP	NASA <u>C</u> rustal <u>D</u> ynamic <u>P</u> roject
CODE	<u>C</u> enter for <u>O</u> rbital <u>D</u> etermination in <u>E</u> urope
COSPAR	<u>C</u> ommittee <u>o</u> n <u>S</u> pace <u>R</u> esearch
DGPS	<u>D</u> ifferential <u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
DOMES	<u>D</u> irectory of <u>M</u> ERIT <u>S</u> ites
ESA	<u>E</u> uropean <u>S</u> pace <u>A</u> gency
ESOC	<u>E</u> uropean <u>S</u> pace <u>O</u> perations <u>C</u> entre
EUREF	<u>E</u> uropean <u>R</u> eference <u>F</u> rame
FOC	<u>F</u> ull <u>O</u> perational <u>C</u> apability
ftp	<u>F</u> ile <u>T</u> ransfer <u>P</u> rotocol
GEODUC	<u>G</u> eodynamics of the <u>U</u> krainian <u>C</u> arpathians
GFZ	<u>G</u> eo <u>F</u> orschungs <u>Z</u> entrum
GNAAC	<u>G</u> lobal <u>N</u> etwork <u>A</u> ssociate <u>A</u> nalysis <u>C</u> enter
GOP	<u>G</u> eodetic <u>O</u> bservatory <u>P</u> ecny
GPS	<u>G</u> lobal <u>P</u> ositioning <u>S</u> ystem
IERS	<u>I</u> nternational <u>E</u> arth <u>R</u> otation <u>S</u> ervice
IfAG	<u>I</u> nstitut für <u>A</u> ngewandte <u>G</u> eodäsie (теперь BKG)
IGF ART	<u>I</u> nstytut <u>G</u> eodezji i <u>F</u> otogrametrii <u>A</u> kademii <u>R</u> olniczo– <u>T</u> echnicznej
IGGA	<u>I</u> nstitute of <u>G</u> eodesy and <u>G</u> eodetic <u>A</u> stronomy
IGK	<u>I</u> nstytut <u>G</u> eodezji i <u>K</u> artografii
IGN	<u>I</u> nstitut <u>G</u> éographique <u>N</u> ational
IGS	<u>I</u> nternational <u>G</u> PS <u>S</u> ervice for Geodynamics
IOC	<u>I</u> nitial <u>O</u> perational <u>C</u> apability
ITRF	<u>I</u> nternational <u>T</u> errestrial <u>R</u> eference <u>F</u> rame
JPL	<u>J</u> et <u>P</u> ropulsion <u>L</u> aboratory
KGF AR	<u>K</u> atedra <u>G</u> eodezji i <u>F</u> otogrametrii <u>A</u> kademii <u>R</u> olniczej
MERIT	<u>M</u> onitoring <u>E</u> arth <u>R</u> otation and <u>I</u> ntercompare the <u>T</u> echniques of

Observation and Analysis

MIT	<u>M</u> assachusetts <u>I</u> nstitute of <u>T</u> echnology
NASA	<u>N</u> ational <u>A</u> eronautics and <u>S</u> pace <u>A</u> dministration
NAVSTAR	<u>N</u> avigation <u>S</u> ystem with <u>T</u> iming and <u>R</u> anging
NCL	University of <u>N</u> ew <u>c</u> astle on Tyne
NGS	<u>N</u> ational <u>G</u> eodetic <u>S</u> urvey
NNSS	<u>N</u> avy <u>N</u> avigation <u>S</u> atellite <u>S</u> ystem
NOAA	<u>N</u> ational <u>O</u> ceanic and <u>A</u> tmospheric <u>A</u> dministration
NRCan	<u>N</u> atural <u>R</u> esources of <u>C</u> anada
OLG	<u>O</u> bservatory <u>L</u> ustbuehel <u>G</u> raz
PRN	<u>P</u> seudorandom <u>N</u> oise
RINEX	<u>R</u> eceiver <u>I</u> ndependent <u>E</u> xchange Format
RTCM	<u>R</u> adio <u>T</u> echnical <u>C</u> ommission for <u>M</u> aritime Services
SA	<u>S</u> elective <u>a</u> vailability
SELF	<u>S</u> ea <u>L</u> evel <u>F</u> luctuations
SGO	<u>S</u> atellite <u>G</u> eodetic <u>O</u> bservatory
SIO	<u>S</u> cripps <u>I</u> nstitution of <u>O</u> ceanography
SOPAC	<u>S</u> cripps <u>O</u> rbital and <u>P</u> ermanent <u>A</u> rray <u>C</u> enter
SRIF	<u>S</u> quare <u>R</u> oot <u>I</u> nformation <u>F</u> ilter
TEC	<u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
TECU	<u>T</u> otal <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent <u>U</u> nit
TVEC	<u>T</u> otal <u>V</u> ertical <u>E</u> lectron <u>C</u> ontent
UTC	<u>U</u> niversal <u>T</u> ime <u>C</u> oordinated
WEGENER	<u>W</u> orking- <u>G</u> roup of <u>E</u> uropean <u>G</u> eo- <u>S</u> cientists for the <u>E</u> stablishment of <u>N</u> etworks for <u>E</u> arth- <u>S</u> cience <u>R</u> esearch
WGS	<u>W</u> orld <u>G</u> eodetic <u>S</u> ystem
WUT	<u>W</u> arsaw <u>U</u> niversity of <u>T</u> echnology

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы.

За последние полтора десятка лет стал доступным для использования огромный потенциал Глобальной системы определения местоположения (GPS), предназначенной для навигации и определения координат различных объектов, для научных и прикладных исследований. Главными факторами бурного развития GPS являются ее всепогодность, оперативность, высокая точность, малые габариты принимающей аппаратуры, простота эксплуатации и относительная небольшая стоимость. К этому следует добавить, что конфигурация орбит GPS-спутников позволяет практически с любой точки земной поверхности принимать сигналы минимум от четырех спутников. Высокая точность обеспечивается принципом измерения, основанном на определении псевдодальностей "GPS-спутник — GPS-приемник" по разности фаз сигнала, принятого от спутника, и сигнала, генерируемого приемником.

Вышеперечисленное определяет актуальность и перспективность использования GPS для решения широкого спектра научных задач, связанных с изучением Земли:

- построения и поддержки земной системы отсчета, которая задается координатами и скоростями пунктов наблюдений,
- изучения неравномерности вращения и движения полюсов Земли,
- исследования деформаций земной поверхности,
- исследования земной атмосферы и ионосферы.

И если на глобальном уровне такие методы космической геодезии, как РСДБ, ЛЛС и лазерная локация Луны, могут конкурировать с GPS, то использование GPS на региональном уровне и на локальных геодинимических полигонах вне конкуренции ввиду ее простоты эксплуатации, дешевизны и мобильности групп наблюдателей.

Важной проблемой обработки GPS-наблюдений является учет влияния ионосферной рефракции на наблюдения, полученные с помощью одночастотных

GPS–приемников. Для этого необходимо иметь модели ионосферы. Не обойтись без этих моделей и при получении решения при обработке двухчастотных наблюдений, выполненных на небольших базах (до 20 км), так как использование безионосферной линейной комбинации невозможно из-за высокого уровня шума. При обработке двухчастотных наблюдений, выполненных на больших базах, модели ионосферы используются при определении фазовых неоднозначностей.

Кроме этого полученные из обработки GPS–наблюдений модели ионосферы могут быть использованы для проверки моделей ионосферы, полученных прямыми методами измерений с помощью ионозондов, некогерентных рассеивающих радаров и т.д.

Все эти факторы указывают на необходимость создания компьютерных программ, позволяющих оценивать параметры ионосферы.

Связь работы с научными программами, планами, темами

Исследования, представленные в диссертации, выполнялись по плану научно–исследовательских тем отдела космической геодинамики

- "Экспериментальные радиотехнические и светолокационные наблюдения небесных тел и их обработка", шифр 1.4.6.115, № госрегистрации 01930007615, 1992–1995 гг. (участие в планировании, организации и проведении крымской части кампании наблюдений GPS–спутников РЕКА–94, обработка данных наблюдений),
- "Создание и развитие системы определения параметров вращения Земли и шкалы всемирного времени", шифр 1.4.6/3–Кт "Ориентация", № госрегистрации 0196U011267, с 1995 г. (создание сети перманентных GPS–станций на территории Украины, участие в планировании, организации, проведении кампании наблюдений GPS–спутников МАО–LN'97 и обработке данных наблюдений),
- "Изучение изменений ориентации Земли в космическом пространстве и других геодинамических явлений по данным ЛЛС, РСДБ и GPS–наблюдений", шифр

1.4.6/5–169В, № госрегистрации 0196U011266, 1996–1999 гг. (участие в обработке данных наблюдений GPS–кампании GEODUC'95),

- "Разработка теории и практическое построение земной системы отсчета для территории Украины по данным космических наблюдений", шифр 1.4.6.129 "Метрика", 1992–1993 гг. (участие в планировании, организации и проведении кампании наблюдений GPS–спутников GEODUC'93),
- "Исследование изменений эквипотенциальной и физической поверхности Черного моря по данным наземных и космических исследований", шифр 1.4.6.137 "Поверхность", 1993 г. (участие в планировании, организации и проведении крымской части кампании наблюдений GPS–спутников РЕКА–93),
- "Единая спутниковая система координатно–временного обеспечения объектов Украины", шифр 1.4.6.123 "Метрика–КВО", 1993–1995 гг. (участие в планировании, организации и проведении кампании наблюдений GPS–спутников GEODUC'95),

в рамках

- международных проектов WEGENER, SELF, "Геодинамика Украинских Карпат" (GEODUC, 1993–1995 гг.),
- Государственной программы "Создание и развитие Государственной службы единого времени и эталонных частот, 1995–1999 гг." ,
- научно–исследовательской работы "Исследования глобальных и региональных явлений и их связи с особенностями вращения Земли" (1997 г.) проекта "Спутниковая геодезия в решении геодинамических проблем" (п.22 Украинско–Польской исполнительной программы по сотрудничеству в сфере науки и технологий "Протокол первой Украинско–Польской комиссии по сотрудничеству в отрасли науки и технологий", 17–19 марта 1997 г., Договор № 2М/1866–97 от 19 ноября 1997 г.).

Цель и задачи исследования

Цели и задачи представленной работы следующие:

- разработка методики привязки координатной системы Украины к Международной земной системе отсчета (ITRF) путем создания перманентных GPS–станций на территории Украины,
- разработка программ проведения кампаний GPS–наблюдений на геодинимических полигонах с целью изучения локальных деформаций земной коры,
- анализ наблюдений GPS–спутников с целью определения высокоточных координат GPS–пунктов на геодинимических полигонах,
- разработка алгоритмов и программ оценки параметров ионосферы из обработки наблюдений GPS–спутников,
- разработка алгоритмов и программ, позволяющих автоматизировать работу перманентной GPS–станции, и применение их на практике.

Научная новизна полученных результатов

1. Впервые в Украине создана сеть перманентных GPS–станций, реализующая на территории страны Международную земную систему отсчета.
2. Из обработки GPS–наблюдений получены высокоточные координаты сети пунктов, расположенных
 - на Крымском геодинимическом полигоне (с точностью 1,0–1,5 мм),
 - в Карпатах (проект GEODUC, с точностью 3,0–9,0 мм),
 - на локальном полигоне ГАО НАН Украины (с точностью 0,1–1,1 мм).
3. Разработана и реализована программа, позволяющая оценить в рамках модели тонкого слоя параметры ионосферы из обработки наблюдений GPS–спутников.
4. Разработана и реализована программа, позволяющая автоматизировать работу перманентной GPS–станции.

Практическое значение полученных результатов

Координаты пунктов сети проекта GEODUC и Крымского геодинимического полигона могут быть использованы в исследованиях тектонических движений и деформаций этих регионов. Локальный полигон ГАО НАН Украины используется УкрЦСМ для аттестации GPS–аппаратуры.

Данные наблюдений на украинских перманентных GPS–станциях используются IGS для вычисления точных эфемерид GPS–спутников, а УкрДАГП — при обработке кампаний GPS–наблюдений прикладного характера.

Разработанное автором программное обеспечение Кlio может быть использовано для оценки параметров ионосферы с целью исключения ионосферной рефракции при обработке одночастотных GPS–наблюдений.

Личный вклад автора

Четыре работы выполнено самостоятельно, пять — в соавторстве. В работах [31, 41, 42] автору принадлежит участие в планировании, организации и проведении GPS–кампаний РЕКА–94, GEODUC'95 и MAO-LN'97 соответственно, в обработке наблюдений и анализе полученных результатов, в работе [35] — участие в организации и проведении GPS–кампаний РЕКА'93 и GEODUC'93, в работе [84] — установка и сопровождение перманентных GPS–станций, входящих в украинскую перманентную сеть пунктов космической геодезии, участие в планировании, организации и проведении GPS–кампаний в рамках международного проекта GEODUC, в обработке наблюдений и анализе полученных результатов.

Апробация результатов диссертации

Результаты, включенные в диссертацию, были представлены на Шестой Генеральной ассамблее проекта WEGENER (1994 г., г. Санкт–Петербург, Россия), на 4–ом Международном семинаре "GPS в Центральной Европе" (1997 г., г. Пенч, Венгрия), Международном совещании по геодезическим измерениям с помощью коллокаций космических методов на Земле (1999 г., г. Токио,

Япония), на Совещании по применению DGPS и ГЛОНАСС на территории государств Центрально–Европейской инициативы (1999 г., г. Триест, Италия), на Научно–техническом симпозиуме "Геомониторинг–99" (1999 г., г. Моршин) и на семинарах отдела космической геодинамики ГАО НАН Украины.

Публикации

Основные результаты диссертации опубликованы в девяти работах: четыре статьи в научных журналах [14–16, 31] и пять статей в материалах научных конференций и семинаров [13, 35, 41, 42, 84].

ГЛАВА 1

ГЛОБАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ (GPS): ОБЗОР

1.1. История создания GPS

В 1973 г. Министерство обороны США приняло решение о создании навигационной системы космического базирования, призванной заменить систему TRANSIT [50, с.3]. TRANSIT (или NNSS) имела два существенных недостатка. Во-первых, большие временные интервалы между прохождениями спутников, приводящие к тому, что пользователи были вынуждены интерполировать координаты своего местонахождения между прохождениями спутников. Во-вторых, координаты, полученные с помощью системы TRANSIT, имели относительно низкую точность. Новая система — NAVSTAR GPS — устраняла эти недостатки. По определению в [82], Глобальная система определения местоположения (GPS) — всепогодная навигационная система космического базирования, разработанная Министерством обороны США для непрерывного обеспечения вооруженных сил, расположенных в любом месте на поверхности Земли или около нее, высокоточными данными про их положение, скорость и время в единой системе отсчета. Как видно из этого определения, GPS разрабатывалась прежде всего для нужд вооруженных сил США. Но Конгресс США позволил гражданским пользователям использовать GPS с некоторыми ограничениями.

В истории создания GPS можно выделить три этапа. На первом этапе (1973–1979 гг.) разрабатывались прототипы спутников, контрольного сегмента и сегмента пользователей. 22 февраля 1978 г. был запущен первый ИСЗ этой системы. К моменту запуска были развернуты четыре станции управления. А в марте 1977 г. были проведены испытания для подтверждения работоспособности системы [10, с.12]. На контрольно-испытательном полигоне армии США в штате Аризона на вершинах гор были установлены четыре передатчика ("псевдоспутника"),

имитирующие сигналы ИСЗ GPS. В числе пользователей были самолеты и сухопутные транспортные средства. В качестве эталонов использовались лазерные дальнометры, обеспечивающие точность измерения расстояния от передатчика до приемника 1 м.

На втором этапе (1979–1984 гг.) проводилось испытание системы, были завершены разработки и изготовление эксплуатационного ИСЗ (в 1982 г.), оборудования контрольного сегмента и развернуты работы по созданию аппаратуры для широкого класса пользователей.

С 1985 г. (третий этап) планировалось начать полномасштабную эксплуатацию системы. На данном этапе количество спутников должно было быть доведено до 18, что дало бы возможность обеспечить видимость четырех–пяти спутников GPS в любой точке Земли круглосуточно. При этом для вывода спутников GPS на орбиту планировалось использовать МТКК "Спейс Шаттл", которые могут взять на борт одновременно четыре–пять спутников. Катастрофа "Челленджера" в январе 1986 г. не дала реализовать эти планы.

В июле 1993 г. количество GPS–спутников, находящихся на орбите, достигло 24, и 8 декабря 1993 г. официально была объявлена Начальная функциональная способность (ИОС) системы, а 27 апреля 1995 г. после успешного завершения тестирования функционирования системы для военных целей — Полная функциональная способность (ФОС).

Важной датой в истории развития GPS является 1 января 1994 г. — официальное начало функционирования Международной геодинимической GPS–службы (IGS) [26].

1.2. Структура GPS

Глобальная система определения местоположения состоит из трех сегментов:

- космического сегмента, состоящего из спутников, передающих специальные сигналы;
- контрольного сегмента, управляющего всей системой;

– сегмента пользователей, включающего в себя все типы GPS–приемников.

1.2.1. Космический сегмент. В настоящее время космический сегмент состоит из 24 спутников (плюс четыре запасных), находящихся на шести почти круговых орбитах (рис. 1.1), наклоненных на 55° к экватору, на высоте около 20200 км от поверхности Земли и имеющих период обращения приблизительно 11 ч 58 мин (половина звездных суток).

GPS–спутник представляет собой платформу, несущую радиопередатчик, атомные часы, компьютер и различное оборудование, обеспечивающее работоспособность спутника (двигатели, солнечные батареи, гироскопы и др.). Электронное оборудование каждого GPS–спутника позволяет пользователю измерить псевдодальность R_R^S от GPS–приемника до данного спутника, а передаваемое спутником навигационное сообщение дает возможность определить геоцентрический вектор положения этого спутника \vec{r}^S для любого момента времени. Все это позволяет пользователю определить геоцентрический вектор своего положения \vec{r}_R на или около поверхности Земли.

GPS–спутники имеют различные системы идентификации: международное обозначение, номер в каталоге NASA, номер в последовательности запусков, номер положения на орбите, номер псевдошумового сигнала (PRN). Последний является наиболее употребительным.

В настоящее время существует 5 классов (или типов) GPS–спутников: Block I, Block II, Block IIА, Block IIR и Block IIF. Внешний вид спутников некоторых типов показан на рис. 1.2.

11 спутников типа Block I (все массой 845 кг) были запущены в период с 1978 г. по 1985 г. с авиабазы Ванденберг в Калифорнии с помощью РН Atlas F (табл. 1.1). Планируемое время их эксплуатации составляло около 4,5 лет. Однако некоторые из них отработали более 10 лет. GPS–спутники этого типа располагались на трех орбитах с углом наклона 63° .

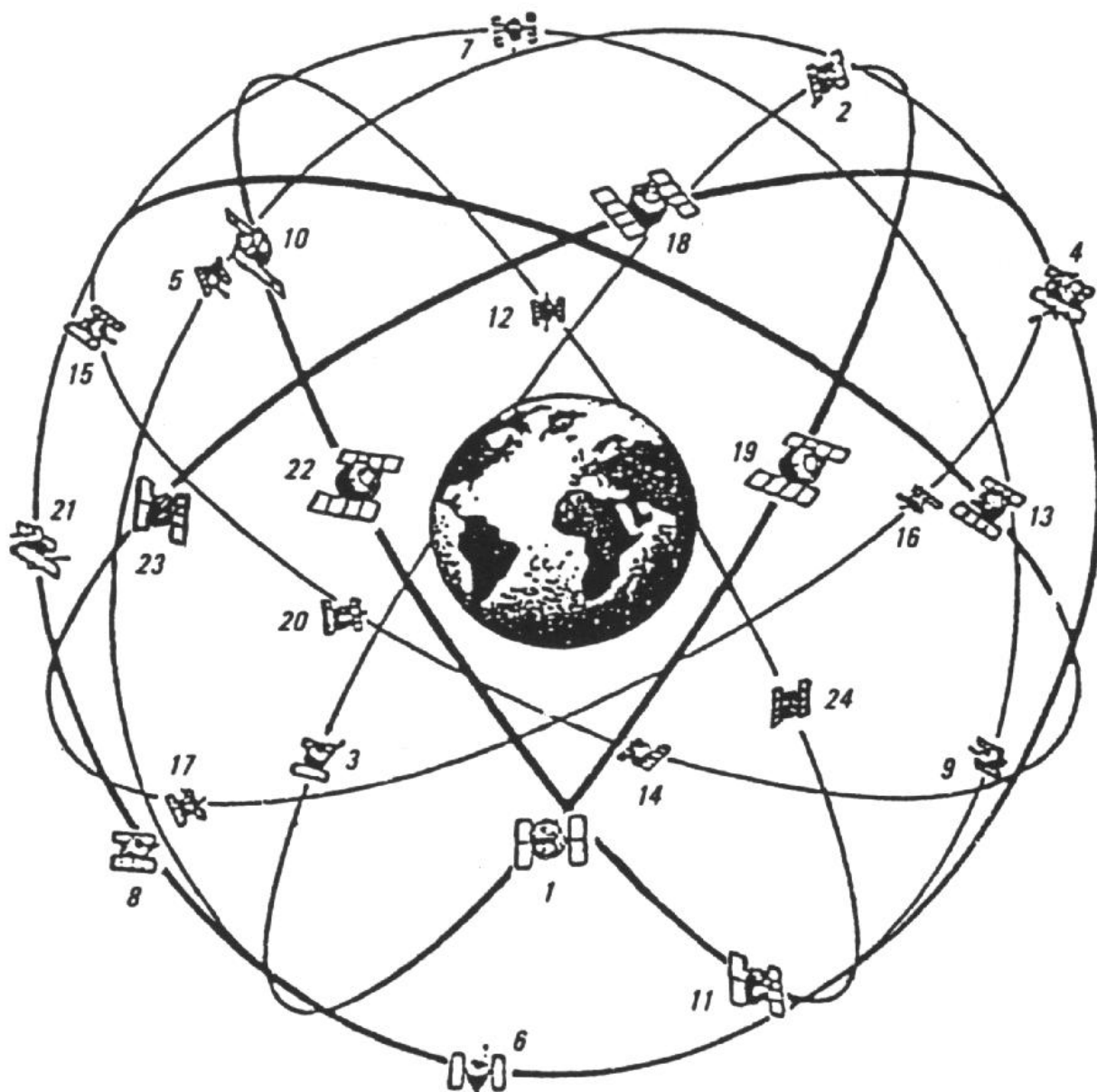


Рис. 1.1. Космический сегмент GPS [70]

Спутники типа Block II (табл. 1.2) отличались от своих предшественников не только массой (первый спутник этого типа весил около 1500 кг) и наклоном орбит (55°), но и возможностью ограничения доступа к передаваемому сигналу. Данные спутники запускались РН Delta II с Космического центра им. Кеннеди, мыс Канаверал, Флорида. Планируемое время эксплуатации составляло 7,5 лет.

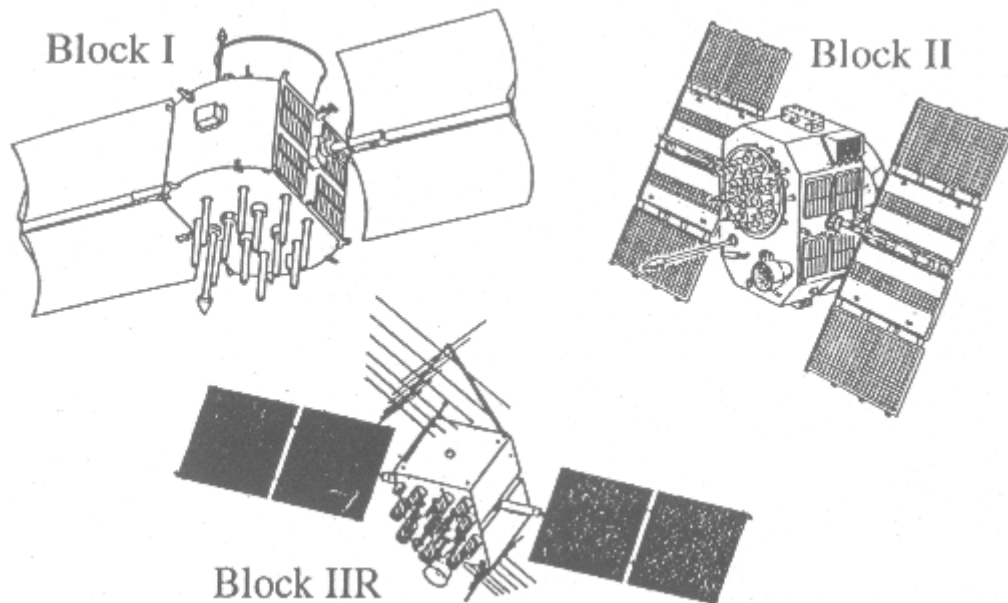


Рис. 1.2. Внешний вид GPS–спутников

Спутники типа Block IIА ("А" обозначает "advanced", табл. 1.3) оборудованы средствами связи друг с другом. Некоторые из них имеют отражатели, что делает возможным их наблюдения станциями ЛЛС.

Следующее поколение GPS–спутников — спутники типа Block IIR ("R" от "replenishment"), способные функционировать более 180 суток в автономном навигационном режиме. Возможность связи между спутниками этого типа и их способность определять взаимное положение позволят им оценивать и обновлять параметры навигационного сообщения без контакта со станциями управления. Спутники типа Block IIR будут иметь на борту трое атомных часов — двое рубидиевых (Rb) и одни цезиевые (Cs). Расчетное время функционирования — 7,8 лет. Даты запусков первых трех спутников этого класса приведены в табл. 1.3.

Запуски спутников типа Block IIF ("F" обозначает "follow on") планируется осуществить в период с 2001 г. по 2010 г. Планируемое время эксплуатации — минимум 10 лет. Эти GPS–спутники будут оборудованы дополнительными бортовыми устройствами (например, внутренняя навигационная система) и будут иметь расширенную структуру сигнала.

Таблица 1.1

GPS–спутники типа Block I

Номер запуска	Номер PRN	Номер COSPAR	Номер в каталоге NASA	Дата запуска	Начало работы	Текущий статус
01	04	1978-020A	10684	22.02.1978	29.03.1978	Не используется с 17.07.1985
02	07	1978-047A	10893	13.05.1978	14.07.1978	Не используется с 16.07.1981
03	06	1978-093A	11054	06.10.1978	13.11.1978	Не используется с 18.05.1992
04	08	1978-112A	11141	10.12.1978	08.01.1979	Не используется с 14.10.1989
05	05	1980-011A	11690	09.02.1980	27.02.1980	Не используется с 28.11.1983
06	09	1980-032A	11783	26.04.1980	16.05.1980	Не используется с 06.03.1991
07	—	—	—	18.12.1981	—	Авария при запуске
08	11	1983-072A	14189	14.07.1983	10.08.1983	Не используется с 04.05.1993
09	13	1984-059A	15039	13.06.1984	19.07.1984	Не используется с 20.06.1994
10	12	1984-097A	15271	08.09.1984	03.10.1984	Не используется с 18.11.1995
11	03	1985-093A	16129	09.10.1985	30.10.1985	Не используется с 13.04.1994

Таблица 1.2

GPS–спутники типа Block II

	Номер запуска	Номер PRN	Номер COSPAS	Номер в каталоге NASA	Дата запуска	Часы	Начало работы	Текущий статус (на 9 апреля 2000 г.)
II–1	14	14	1989-013A	19802	14.02.1989	Rb	15.04.1989	Положение на орбите: E-1
II–2	13	02	1989-044A	20061	10.06.1989	Cs	10.08.1989	Положение на орбите: B-3
II–3	16	16	1989-064A	20185	18.08.1989	Cs	14.10.1989	Положение на орбите: E-5
II–4	19	19	1989-085A	20302	21.10.1989	Cs	23.11.1989	Положение на орбите: A-5
II–5	17	17	1989-097A	20361	11.12.1989	Cs	06.01.1990	Положение на орбите: D-3
II–6	18	18	1990-008A	20452	24.01.1990	Cs	14.02.1990	Положение на орбите: F-3
II–7	20	20	1990-025A	20533	26.03.1990	—	18.04.1990	Не используется с 21.05.1996
II–8	21	21	1990-068A	20724	02.08.1990	Cs	22.08.1990	Положение на орбите: E-2
II–9	15	15	1990-088A	20830	01.10.1990	Cs	15.10.1990	Положение на орбите: D-5

Таблица 1.3

GPS-спутники типов Block IIА и Block IIR

	Номер запуска	Номер PRN	Номер COSPAS	Номер в каталоге NASA	Дата запуска	Часы	Начало работы	Текущий статус (на 9 апреля 2000 г.)
Block IIА								
IIА-10	23	23	1990-103A	20959	26.11.1990	Cs	10.12.1990	Положение на орбите: E-4
IIА-11	24	24	1991-047A	21552	04.07.1991	Rb	30.08.1991	Положение на орбите: D-1
IIА-12	25	25	1992-009A	21890	23.02.1992	Cs	24.03.1992	Положение на орбите: A-2
IIА-13	28	28	1992-019A	21930	10.04.1992	—	25.04.1992	Не используется с мая 1997
IIА-14	26	26	1992-039A	22014	07.07.1992	Rb	23.07.1992	Положение на орбите: F-2
IIА-15	27	27	1992-058A	22108	09.09.1992	Cs	30.09.1992	Положение на орбите: A-4
IIА-16	32	01	1992-079A	22231	22.11.1992	Cs	11.12.1992	Положение на орбите: F-4
IIА-17	29	29	1992-089A	22275	18.12.1992	Rb	05.01.1993	Положение на орбите: F-1
IIА-18	22	22	1993-007A	22446	03.02.1993	Rb	04.04.1993	Положение на орбите: B-1
IIА-19	31	31	1993-017A	22581	30.03.1993	Cs	13.04.1993	Положение на орбите: C-3
IIА-20	37	07	1993-032A	22657	13.05.1993	Rb	12.06.1993	Положение на орбите: C-4
IIА-21	39	09	1993-042A	22700	26.06.1993	Cs	20.07.1993	Положение на орбите: A-1
IIА-22	35	05	1993-054A	22779	30.08.1993	Cs	28.09.1993	Положение на орбите: B-4
IIА-23	34	04	1993-068A	22877	26.10.1993	Rb	22.11.1993	Положение на орбите: D-4

Продолжение табл. 1.3

	Номер запуска	Номер PRN	Номер COSPAR	Номер в каталоге NASA	Дата запуска	Часы	Начало работы	Текущий статус (на 9 апреля 2000 г.)
ПА–24	36	06	1994-016A	23027	10.03.1994	Cs	28.03.1994	Положение на орбите: C-1
ПА–25	33	03	1996-019A	23833	28.03.1996	Cs	09.04.1996	Положение на орбите: C-2
ПА–26	40	10	1996-041A	23953	16.07.1996	Cs	15.08.1996	Положение на орбите: E-3
ПА–27	30	30	1996-056A	24320	12.09.1996	Cs	01.10.1996	Положение на орбите: B-2
ПА–28	38	08	1997-067A	25030	06.11.1997	Rb	18.12.1997	Положение на орбите: A-3
Block IIR								
IIR–1	42	12	—	—	17.01.1997	—	—	Авария при запуске
IIR–2	43	13	1997-035A	24876	23.07.1997	Rb	31.01.1998	Положение на орбите: F-5
IIR–3	46	11	1999-055A	25933	07.10.1999	Rb	03.01.2000	Положение на орбите: D-2

1.2.2. Контрольный сегмент. Контрольный сегмент GPS состоит из главной станции управления, нескольких станций слежения и дополнительных станций управления (рис. 1.3).



Рис. 1.3. Контрольный сегмент GPS [79]

Основные задачи этого сегмента:

- наблюдения GPS–спутников для определения и предсказания параметров их орбит и поправок к часам спутников,
- синхронизация часов GPS–спутников,
- передача данных на GPS–спутники.

Главная станция управления первоначально была расположена на авиабазе США Ванденберг, Калифорния, но позже была перенесена в Объединенный центр космических операций на авиабазу Фалкон, Коллорадо–Спрингс, штат Коллорадо. Главная станция управления на основе данных наблюдений GPS–спутников на станциях слежения вычисляет орбиты GPS–спутников и поправки к часам спутников, используя фильтр Кальмана. Полученные результаты направляются на

дополнительные станции управления для передачи на спутники. Главная станция управления также осуществляет контроль состояния GPS–спутников и системы в целом.

В контрольный сегмент входит пять станций слежения, расположенных на Гавайских островах, острове Вознесения (южная часть Атлантического океана), острове Диего–Гарсия (Индийский океан), атолле Кваджалейн (Тихий океан) и в Колорадо–Спрингс (совмещенная с главной станцией управления). Эти станции оборудованы точными цезиевыми стандартами времени и GPS–приемниками, ведущими непрерывные наблюдения GPS–спутников с интервалом 1,5 секунды. Полученные наблюдения сглаживаются с ионосферными и метеорологическими данными для получения пятнадцатиминутных интервалов данных, которые передаются на главную станцию управления. Сеть станций слежения является официальной сетью для определения навигационных орбит и поправок к часам спутников. Для определения точных орбит дополнительно используются данные наблюдений на пяти станциях Военного картографического агентства США (рис. 1.3).

Три дополнительных станции управления совмещены со станциями слежения на островах Вознесения, Диего–Гарсия и атолле Кваджалейн. Эти станции передают на GPS–спутники информацию об орбитах и поправках к часам спутников, вычисленных на главной станции управления. Первоначально данные на каждый спутник передавались каждые 8 часов. Теперь передачи осуществляются 1–2 раза в день.

1.2.3. Сегмент пользователей. Сегмент пользователей — это совокупность элементов, необходимых для получения сигналов, передаваемых с GPS–спутников.

Среди пользователей можно выделить две категории: военных и гражданских. GPS создавалась США прежде всего для своих военных целей. Планировалось, что каждое военное движущееся средство (самолеты, танки, корабли, спутники и т.д.) и группы пехотинцев будут иметь GPS–приемники, что позволит координировать их

военную активность. Можно сказать, что "боевое крещение" GPS получила во время операции "Буря в пустыне" (Персидский залив, 1991 г.). GPS-приемники использовались как на высокоточном оружии [67], так и для ориентации наземных сил, что наиболее ценно в пустыне ввиду отсутствия естественных ориентиров.

С тех пор, как Конгресс США разрешил гражданским пользователям использовать GPS, эта система прочно вошла в повседневную жизнь. Было создано множество моделей GPS-приемников от простых дешевых кодовых, дающих точность в десятки метров, до высокоточных геодезических стоимостью в несколько десятков тысяч долларов США, обеспечивающих точность определяемых координат после обработки GPS-наблюдений в доли миллиметра.

DGPS [58] расширила возможности GPS. И теперь GPS используется не только для геодинамических, геодезических, картографических целей, но и для посадки самолетов гражданской авиации и МТКК "Спейс Шаттл" [34], для контроля местонахождения машин общественного транспорта [56], скорой помощи [68], спецмашин, перевозящих опасные грузы и т.д. GPS используют яхтсмены, автолюбители, туристы. С помощью GPS определяют состояние ионосферы [37, 61, 75], предсказывают землетрясения [29], изучают морские течения [77], следят за уровнями морей [29, 54, 85] и рек [19].

Но гражданские пользователи могут использовать GPS с некоторыми ограничениями. Министерство Обороны США имеет два способа уменьшения точности: метод предотвращения имитации сигнала (A-S) и селективный доступ (SA).

Метод предотвращения имитации сигнала заключается в кодировании P-кода дополнительным W-кодом. Полученный Y-код доступен лишь узкому кругу пользователей. Начиная с 1 августа 1992 г., A-S включался на некоторые периоды времени для тестовых целей, а с 31 января 1994 г. включен постоянно.

Селективный доступ представляет собой уменьшение точности C/A-кода путем ввода ошибок в показания часов GPS-спутников (δ -процесс) и манипулированием передаваемыми эфемеридами (ϵ -процесс). Первоначально

предполагалось, что точность определения координат при помощи C/A–кода будет составлять около 400 м. Однако тесты показали, что возможно достичь точность 15–40 м для координат и меньше 1 м/с для скорости. При доверительной вероятности SA в 95% точность определяемых координат падает до 100 м для горизонтальных компонент и до 156 м для вертикальной. SA стал возможен только для спутников типа Block II, был введен с 25 марта 1990 г. по 1 мая 2000 г. и временно выключался во время операции "Буря в пустыне".

1.3. Структура сигнала

Все компоненты сигнала, передаваемого GPS–спутником (табл. 1.4), получаются из фундаментальной частоты f_0 , генерируемой спутниковым осциллятором. Стабильность фундаментальной частоты для спутников типа Block II составляет порядка 10^{-13} [57]. Для устранения релятивистских эффектов фундаментальная частота уменьшена на 0,005 Гц.

Таблица 1.4.

Компоненты сигнала GPS–спутника

Компонент	Частота, МГц
Фундаментальная частота f_0	10,23
Несущая частота L_1 , $f_1 = 154 \cdot f_0$	1575,42
Несущая частота L_2 , $f_2 = 120 \cdot f_0$	1227,60
P–код $P_{C/A}$, f_0	10,23
C/A–код $C_{C/A}$, $f_0/10$	1,023
W–код $W_{C/A}$, $f_0/20$	0,5115
Навигационное сообщение $D_{C/A}$, $f_0/204600$	$50 \cdot 10^{-6}$

Две синусоидальные несущие частоты f_1 и f_2 (с соответствующими длинами волн $\lambda_1=19,0$ см и $\lambda_2=24,4$ см) модулируются кодами и навигационным сообщением для передачи информации о показании часов GPS–спутника, параметров орбиты и т.д. Для этого используется так называемая бифазовая модуляция сигнала [50, с. 75].

Два кода $P(t)$, $C(t)$ и навигационное сообщение $D(t)$ состоят из последовательностей положений $+1$ и -1 . C/A–код повторяется каждую миллисекунду и накладывается только на несущую частоту f_1 со сдвигом на $\pi/2$ относительно P–кода. P–код повторяется приблизительно каждые 266,4 суток. При введенном методе предотвращения имитации сигнала P–код зашифровывается W–кодом. В результате получается Y–код, которым модулируются обе несущие частоты. Полученные модулируемые частоты можно записать в виде [50, с. 76]:

$$L_1 = a_p P(t) W(t) D(t) \cos(f_1 t) + a_c C(t) D(t) \sin(f_1 t),$$

$$L_2 = b_p P(t) W(t) D(t) \cos(f_2 t),$$

где a_p , a_c , b_p — амплитуды сигналов.

1.4. Уравнения наблюдений

1.4.1. Общие положения. Все наблюдаемые при использовании GPS величины представляют собой данные типа дальностей от фазового центра передатчика GPS–спутника до фазового центра принимающей антенны GPS–приемника (далее дальность "спутник–приемник"), получаемые из измеряемых времени распространения сигнала или разностей фаз, основанных на сравнении полученного сигнала и сигнала, генерируемого приемником. Особенностью этих наблюдаемых величин является то, что они суть псевдодальности, то есть дальности, отягощенные систематическими ошибками аппаратного характера.

1.4.2. Кодовые псевдодалности. Сравнивая код, полученный со спутника (С/А–код или Р–код), с кодом, генерируемым приемником, можно получить время распространения сигнала между спутником и приемником, а следовательно, получить кодовую псевдодалность.

Обозначим через t^S показания часов GPS–спутника в момент передачи сигнала, через t_R — показания часов GPS–приемника в момент приема сигнала, а через Δt^S и Δt_R — ошибки часов спутника и приемника по отношению к системному времени GPS соответственно. То есть

$$\begin{aligned} t_R &= t_R \langle \text{GPS} \rangle - \Delta t_R, \\ t^S &= t^S \langle \text{GPS} \rangle - \Delta t^S. \end{aligned}$$

Тогда время распространения сигнала между спутником и приемником

$$\begin{aligned} \Delta \tau_R^S &= t_R - t^S = \langle t_R \langle \text{GPS} \rangle - t^S \langle \text{GPS} \rangle \rangle + \Delta t^S - \Delta t_R = \\ &= \Delta t_R^S + \Delta t^S - \Delta t_R, \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $\Delta t_R^S = \langle t_R \langle \text{GPS} \rangle - t^S \langle \text{GPS} \rangle \rangle$.

Умножая $\Delta \tau_R^S$ на скорость света c , получаем кодовую псевдодалность:

$$R_R^S = c \cdot \Delta \tau_R^S = c \cdot \Delta t_R^S + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R. \quad (1.2)$$

Первое слагаемое в (1.2) можно записать в виде [70, с. 26]:

$$c \cdot \Delta t_R^S = \rho_R^S + \Delta \rho^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} - v_R^S, \quad (1.3)$$

$$\text{где } \rho_R^S = \left| \vec{r}^S \langle \text{GPS} \rangle - \vec{r}_R \langle \text{GPS} \rangle \right| \quad (1.4)$$

— расстояние между положением GPS-спутника в эпоху $t^S \langle GPS \rangle$ и положением GPS-приемника в эпоху $t_R \langle GPS \rangle$,

$\vec{r}^S \langle GPS \rangle$ — геоцентрическое положение GPS-спутника в эпоху $t^S \langle GPS \rangle$ в инерциальной системе отсчета,

$\vec{r}_R \langle GPS \rangle$ — геоцентрическое положение GPS-приемника в эпоху $t_R \langle GPS \rangle$ в инерциальной системе отсчета,

$\Delta \rho^{ion}$ — ионосферная рефракция,

$\Delta \rho^{tropo}$ — тропосферная рефракция,

$\Delta \rho^{rel}$ — релятивистская поправка,

v_R^S — шум измерений плюс немоделируемые эффекты.

Тогда уравнение наблюдений для кодовой псевдодальности (1.2) примет вид:

$$R_R^S = \rho_R^S + \Delta \rho^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R - v_R^S. \quad (1.5)$$

Как видно из (1.4), величина ρ_R^S является функцией двух различных эпох. Поэтому ее часто представляют в виде разложения в ряд Тейлора вокруг, например, эпохи излучения сигнала $t^S \langle GPS \rangle$, пренебрегая членами выше первой степени:

$$\begin{aligned} \rho_R^S &= \rho_R^S \langle t^S \langle GPS \rangle, t_R \langle GPS \rangle \rangle = \rho_R^S \langle t^S \langle GPS \rangle, t^S \langle GPS \rangle + \Delta t_R^S \rangle = \\ &= \rho_R^S \langle t^S \langle GPS \rangle \rangle + \dot{\rho} \langle t^S \langle GPS \rangle \rangle \Delta t_R^S, \end{aligned}$$

где $\dot{\rho}$ обозначает радиальную скорость GPS-спутника по отношению к GPS-приемнику.

Точность псевдодальностей, получаемых из кодовых наблюдений, обычно составляет приблизительно 1% от длины импульса кода [50, с. 90]. Следовательно, достигается точность 3 м и 0,3 м при использовании C/A-кода и P-кода соответственно.

1.4.3. Фазовые псевдодальности. Сравнивая полученную фазу $\phi^S(t_R^S)$ сигнала, переданного с GPS-спутника, с фазой $\phi_R(t_R)$ сигнала, генерируемого в GPS-приемнике, получаем разность фаз

$$\Delta\phi_R^S = \phi_R(t_R) - \phi^S(t_R^S).$$

Учитывая (1.1), запишем это равенство в виде:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_R^S &= \phi_R(t_R) - \phi^S(t_R - \Delta\tau_R^S) = \\ &= \phi_R(t_R) - \phi^S(t_R - \Delta t_R^S - \Delta t^S + \Delta t_R) = \\ &= f \cdot t_R - f \cdot t_R + f \cdot \Delta t_R^S + f \cdot \Delta t^S - f \cdot \Delta t_R = \\ &= f \cdot (\Delta t_R^S + \Delta t^S - \Delta t_R) \end{aligned} \quad (1.6)$$

где f — передающая частота.

В начальный момент времени измеряется только дробная часть фазы, в то время как число целых циклов N в этот момент времени является неизвестным. Если наблюдения данного GPS-спутника осуществляются без потери слежения, то это число, называемое фазовой неоднозначностью, остается постоянным. Тогда наблюдаемая фаза сигнала, выраженная в метрах, может быть записана в виде:

$$\Phi = \lambda \cdot \Delta\phi_R^S + \lambda N, \quad (1.7)$$

где λ — длина волны, соответствующая частоте f .

Подставляя (1.7) в (1.6), получим

$$\Phi = \lambda f \cdot (\Delta t_R^S + \Delta t^S - \Delta t_R) + \lambda N. \quad (1.8)$$

Так как $\lambda f = c$, и, используя (1.3), запишем (1.8) в виде

$$\Phi = \rho_R^S + \Delta \rho^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + \lambda N - v_R^S. \quad (1.9)$$

Уравнение (1.9) является уравнением наблюдений для фазовых наблюдений.

Фаза несущей частоты может быть измерена с точностью выше 0,01 цикла [50, с. 92], что соответствует миллиметровой точности. Как видно, фазовые измерения гораздо точнее кодовых. Поэтому разности фаз являются основными измеряемыми величинами для решения задач высокоточных определений положений для геодезических, геодинамических и прочих целей.

1.4.4. Линейные комбинации. При обработке данных GPS-наблюдений во многих ситуациях удобно использовать различные линейные комбинации кодовых измерений или фазовых наблюдений на частотах L_1 и L_2 . Общий вид линейной комбинации:

$$\tilde{L}_k = a_{k1} \cdot L_1 + a_{k2} \cdot L_2, \quad (1.10)$$

где L_1, L_2 — наблюдения на частотах L_1, L_2 (в циклах),

a_{k1}, a_{k2} — коэффициенты линейной комбинации,

\tilde{L}_k — линейная комбинация (в циклах).

Частота и длина волны полученной линейной комбинации \tilde{L}_k могут быть записаны в виде:

$$f_k = a_{k1} \cdot f_1 + a_{k2} \cdot f_2,$$

$$\lambda_k = \frac{c}{f_k} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{a_{k1} \cdot \lambda_2 + a_{k2} \cdot \lambda_1},$$

где f_1, f_2 — частоты несущих L_1 и L_2 ,

λ_1, λ_2 — длины волн несущих L_1 и L_2 .

Используя наблюдаемые величины, выраженные в метрах, вместо (1.10) запишем [70, с. 31]

$$L_k = x_{k1} \cdot \Phi_1 + x_{k2} \cdot \Phi_2,$$

где $x_{ki} = a_{ki} \cdot \frac{\lambda_k}{\lambda_i}$, $i = 1, 2$.

Аналогично формируются линейные комбинации для кодовых наблюдений.

Наиболее используемыми являются следующие линейные комбинации:

- безионосферная линейная комбинация L_3 . Преимущество данной линейной комбинации заключается в исключении (вернее, в значительном уменьшении) ионосферной рефракции;
- линейная комбинация L_4 . Эта комбинация не зависит от ошибок синхронизации часов GPS–приемника и членов, относящихся к геометрии (орбит, координат). Она содержит только ионосферную рефракцию и (для фазовых наблюдений) фазовые неоднозначности;
- широкополосная линейная комбинация L_5 . В основном используется для определения фазовых неоднозначностей на длинных базах (более 50 км), так как фазовая неоднозначность N_5 есть разность между фазовыми неоднозначностями на L_1 и L_2 , то есть $N_5 = N_1 - N_2$. Из-за большой длины волны (≈ 86 см) определение неоднозначностей на L_5 легче и реалистичнее, чем на несущих L_1 и L_2 . Полученные величины N_5 могут быть использованы для определения неоднозначностей N_1 и N_2 .

Характеристики этих основных линейных комбинаций приведены в табл.1.5.

Для определения фазовых неоднозначностей часто используется линейная комбинация Вюббенна–Мельбурна L_{WM} , включающая в себя как фазовые, так и кодовые наблюдения [70, с. 33]:

$$L_{WM} = x_{WM1} \cdot \Phi_1 + x_{WM2} \cdot \Phi_2 + x_{WM3} \cdot P_1 + x_{WM4} \cdot P_2, \quad (1.11)$$

Таблица 1.5.

Характеристики основных линейных комбинаций

Линейная комбинация L_k	Длина волны λ_k	Коэффициенты линейной комбинации	
		x_{k1}	x_{k2}
L_3	0	$\frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2}$	$-\frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$
L_4	∞	1	-1
L_5	$\frac{c}{f_1 - f_2}$	$\frac{f_1}{f_1 - f_2}$	$-\frac{f_2}{f_1 - f_2}$

где

$$x_{WM1} = \frac{f_1}{f_1 - f_2},$$

$$x_{WM2} = -\frac{f_2}{f_1 - f_2},$$

$$x_{WM3} = -\frac{f_1}{f_1 + f_2},$$

$$x_{WM4} = -\frac{f_2}{f_1 + f_2},$$

P_1, P_2 — наблюдения P-кода на несущих частотах L_1 и L_2 .

Подставляя (1.5) и (1.9) в (1.11), легко получить

$$\lambda_5 \cdot (N_1 - N_2) \cdot L_{WM} = v_{WM}.$$

Видно, что наблюдения на L_{WM} не зависят от координат GPS-приемника и GPS-спутников, ионосферной и тропосферной рефракций. Единственной проблемой может быть многопутность. Таким образом L_{WM} при хороших наблюдениях P-кода может быть использована для нахождения фазовых неоднозначностей N_5 для широкополосной линейной комбинации L_5 независимо от длин баз.

1.5. Основные источники ошибок

1.5.1. Типы ошибок. Кодовые (1.5) и фазовые (1.9) псевдодальности подвержены влиянию как систематических ошибок, так и случайного шума. Источники ошибок могут быть разделены на три группы [50, с. 93]: GPS–спутник, среда распространения сигнала и GPS–приемник. В табл. 1.6 приведены некоторые основные типы ошибок.

Таблица 1.6

Систематические ошибки псевдодальностей

Источник	Эффект
GPS–спутник	Орбитальные ошибки, ошибки часов, сдвиги антенны, изменения положения фазового центра антенны
Среда распространения	Тропосферная рефракция, ионосферная рефракция
GPS–приемник	Изменения положения фазового центра антенны, ошибки часов, дополнительные отражения сигнала

К перечисленным ошибкам следует добавить влияние релятивистских эффектов.

Влияние некоторых систематических ошибок можно смоделировать или устранить путем формирования линейных комбинаций (см. п. 1.4.4).

1.5.2. Ошибки, привносимые спутником. Из этой категории ошибок прежде всего следует выделить орбитальные ошибки, то есть ошибки, возникающие из-за неточного знания орбит GPS-спутников. Оценить влияние этих ошибок на точность определения координат GPS-станций можно с помощью простого соотношения [70, с. 38]:

$$\frac{|\Delta \vec{B}|}{|\vec{B}|} \approx \frac{|\Delta \vec{r}^S|}{|\vec{r}^S|}$$

где \vec{r}^S — геоцентрическое положение GPS-спутника в инерциальной системе отсчета,

$\Delta \vec{r}^S$ — орбитальная ошибка,

\vec{B} — вектор базы между двумя GPS-станциями,

$\Delta \vec{B}$ — ошибка вектора базы.

Таким образом орбитальная ошибка $|\Delta \vec{r}^S|=1$ м приводит к относительной ошибке вектора базы $|\Delta \vec{B}|/|\vec{B}| \approx 4 \cdot 10^{-8}$, что для базы длиной в 100 км составляет 4 мм.

Как было указано в п. 1.4.1, расстояние между GPS-спутником и GPS-приемником определяется из времени прохождения сигнала. Это время, в свою очередь, получается путем сравнения показаний часов приемника и спутника. GPS-спутники оборудованы точными атомными часами, но эти часы не идеальны. Их стабильность составляет $(1-2) \cdot 10^{-13}$ в сутки [57]. Таким образом часы спутника лишь приблизительно синхронизированы с временем GPS. В следствие этого в измеренное расстояние между GPS-спутником и GPS-приемником входит ошибка, вызванная рассинхронизацией часов спутника. Поправку к часам каждого спутника можно определить из полинома второй степени, коэффициенты которого передаются в навигационном сообщении.

1.5.3. Ошибки, обусловленные средой распространения сигнала. К ошибкам этой категории относятся тропосферная и ионосферная рефракции.

Тропосферная рефракция обусловлена воздействием нейтральной (то есть неионизированной) атмосферы. В нейтральной атмосфере распространение радиосигнала не зависит от его частоты, следовательно, тропосферная рефракция одинакова для частот L_1 и L_2 .

Ошибки учета тропосферной рефракции в GPS-измерениях влияют прежде всего на общий масштаб геодезических построений и на точность определения высот пунктов, влияние этих ошибок на горизонтальные координаты сказывается в гораздо меньшей мере.

Тропосферная рефракция определяется по формуле [23]:

$$\Delta \rho^{tropo} = \int (n - 1) ds = 10^{-6} \cdot \int N^{tropo} ds, \quad (1.12)$$

где n — коэффициент рефракции,

N^{tropo} — коэффициент преломления,

интеграл берется вдоль пути распространения сигнала.

Согласно [51] N^{tropo} возможно разделить на сухую и влажную компоненты:

$$N^{tropo} = N_d^{tropo} + N_w^{tropo},$$

где сухая компонента N_d^{tropo} является результатом влияния сухой атмосферы, а влажная компонента N_w^{tropo} — водяного пара в атмосфере. Тогда (1.12) можно записать в виде:

$$\Delta \rho^{tropo} = \Delta \rho_d^{tropo} + \Delta \rho_w^{tropo} = 10^{-6} \cdot \int N_d^{tropo} ds + 10^{-6} \cdot \int N_w^{tropo} ds.$$

Приблизительно 90% тропосферной рефракции составляет влияние сухой компоненты, а остальные 10% — влажной [52].

Коэффициенты преломления на поверхности Земли моделируются следующим образом [38]:

$$N_{d,0}^{tropo} = \bar{c}_1 \frac{p}{T},$$

$$N_{w,0}^{tropo} = \bar{c}_2 \frac{p_e}{T} + \bar{c}_3 \frac{p_e}{T^2},$$

где p — атмосферное давление (в мбар),
 p_e — парциальное давление водяного пара (в мбар),
 T — температура (в градусах Кельвина),
 $\bar{c}_1 = 77,64$ К/мбар,
 $\bar{c}_2 = -12,96$ К/мбар,
 $\bar{c}_3 = 3,718 \cdot 10^5$ К²/мбар.

Численные значения коэффициентов \bar{c}_1 , \bar{c}_2 и \bar{c}_3 определены импирическим путем.

Тропосферная задержка зависит от расстояния, которое проходит радиосигнал через нейтральную атмосферу и, следовательно, зависит от зенитного расстояния GPS-спутника. То есть можно записать

$$\Delta \rho^{tropo} = M \epsilon(z) \cdot \Delta \rho_0^{tropo},$$

где $\Delta \rho_0^{tropo}$ — тропосферная рефракция в зените,
 $M \epsilon(z)$ — коэффициент наклона,
 z — зенитное расстояние GPS-спутника.

Согласно [70] необходимо использовать различные коэффициенты наклона для сухой и влажной составляющих:

$$\Delta \rho^{tropo} = M_d \epsilon(z) \cdot \Delta \rho_{d,0}^{tropo} + M_w \epsilon(z) \cdot \Delta \rho_{w,0}^{tropo}.$$

Однако для спутников с зенитным расстоянием 70° и меньше достаточно взять

$$M_d \overline{\epsilon} = M_w \overline{\epsilon} = \frac{1}{\cos z},$$

если вычисляется поправка к используемой некоторой априорной модели тропосферы.

Существует множество моделей тропосферной рефракции: Хопфилда, Саастамойнена, модифицированная модель Хопфилда и другие. В качестве априорной чаще всего используется модель Саастамойнена [73]:

$$\Delta \rho^{tropo} = \frac{0,002277}{\cos z} \cdot \left(p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) p_e - tg^2 z \right),$$

где $\Delta \rho^{tropo}$ — тропосферная рефракция (в метрах),

p — атмосферное давление (в мбар),

p_e — парциальное давление водяного пара (в мбар),

T — температура (в градусах Кельвина),

z — зенитное расстояние GPS-спутника.

В работе [23] приводится усовершенствованная модель Саастамойнена:

$$\Delta \rho^{tropo} = \frac{0,002277}{\cos z} \cdot \left(p + \left(\frac{1255}{T} + 0,05 \right) p_e - B \cdot tg^2 z \right) + \delta R.$$

Поправки B и δR являются функциями высоты пункта наблюдения, кроме этого δR зависит от зенитного расстояния GPS-спутника. Получить эти поправки можно методом интерполяции данных специальных таблиц (например, [50, табл. 6.3–6.4]).

Ионосферная рефракция, обусловленная влиянием ионизированной атмосферы, и ее моделирование подробно рассматриваются в Главе 3.

1.5.4. Ошибки, привносимые приемником. Основной из этой группы ошибок является ошибка часов GPS–приемника. Эта ошибка гораздо больше по сравнению с ошибкой часов GPS–спутника, так как стабильность часов приемника составляет около $1 \cdot 10^{-10}$ в сутки [36]. Поэтому поправка к показанию часов приемника должна рассматриваться как неизвестная величина [55].

Эффект многопутности связан с интерференцией основного сигнала с сигналом, отраженным от строений и других объектов. Влиянию многопутности подвержены и кодовые, и фазовые измерения. Многопутность может приводить как к увеличению, так и к уменьшению измеренной псевдодальности. Теоретически максимальная ошибка может достигать для P–кодовых измерений 15 м, для C/A–кодовых — 150 м. Обычно ошибка псевдодальности составляет около 0,5 м для наблюдений на открытой местности и 4–5 м на местности с большим числом отражающих поверхностей. Типичная ошибка псевдодальности представляет собой синусоиду с периодом 6–10 минут [57].

Избежать влияния многопутности можно, выбирая пункты для наблюдений на открытой местности, а также используя GPS–антенны, чувствительные к поляризации сигнала (GPS–сигнал имеет правовинтовую поляризацию, а отраженный — левовинтовую) или оборудованные специальными средствами, например, дроссельными кольцами.

GPS–измерения относятся к так называемому фазовому центру GPS–антенны, который не совпадает с физическим центром антенны. Это различие зависит от угла места, азимута наблюдаемого GPS–спутника, отличается для наблюдений на частотах L_1 и L_2 и состоит из постоянного сдвига и вариаций фазового центра. Ошибки, происходящие из-за этого эффекта, определяются путем калибровки GPS–антенн [59, 60, 62, 72].

1.6. Международная геодинамическая GPS–служба (IGS)

1.6.1. История создания IGS. К 1989 г. резко возросло количество GPS–приемников, используемых для научных, прежде всего геофизических, целей. Однако GPS–наблюдения и последующая обработка данных этих наблюдений не основывались на общих стандартах, что усложняло геодинамическую интерпретацию полученных результатов. Другой проблемой было обеспечение научного сообщества точными эфемеридами GPS–спутников, параметрами вращения Земли и точной информацией о часах GPS–спутников.

Для решения этих проблем Международная геодезическая ассоциация решила создать Международную геодинамическую GPS–службу (IGS) [27]. Кроме указанных целей рассматривались возможности географического расширения ITRF и мониторинга глобальных деформаций земной коры [64].

Более 100 организаций приняли участие в тестовой GPS–кампании с 21 июня по 23 сентября 1992 г. [25]. В ходе кампании проверялись готовность IGS к функционированию, возможность регулярного получения точных эфемерид и ПВЗ. Третий съезд организационного комитета IGS в октябре 1992 г., стремясь покрыть пробел между тестовой кампанией и началом регулярной работы IGS, начал с 1 ноября 1992 г. проект IGS Pilot Service, в ходе которого продолжались вычисления орбит GPS–спутников.

Основываясь на успехах тестовой кампании и IGS Pilot Service, организационный комитет IGS на своем четвертом съезде в марте 1993 г. решил начать официальное функционирование IGS с 1 января 1994 г.

1.6.2. Структура IGS. В структуре IGS каждый компонент имеет свои специфические обязанности, но его работа зависит от работы других структурных единиц. Среди компонентов IGS можно выделить следующие (рис. 1.4) [65]:

- сеть станций наблюдения;
- операционные центры;

- региональные центры сбора данных;
- глобальные центры сбора данных;
- центры анализа;
- координатор центров анализа;
- Центральное бюро IGS;
- Международный управляющий совет.



Рис. 1.4. Структура IGS

Сеть IGS состоит из GPS-станций (на 8 апреля 2000 г. — 230 станций), расположенных на всей земной поверхности. Эти станции оборудованы высокоточными геодезическими двухчастотными GPS-приемниками, ведущими круглосуточные наблюдения, а также дополнительным оборудованием, позволяющим быстро передавать данные наблюдений в центры сбора данных.

Центры сбора данных по своим функциям делятся на операционные центры, региональные и глобальные центры сбора данных. Еще одна дополнительная категория — локальные центры сбора данных. Их функции похожи на функции

региональных центров сбора данных, только данные собираются с меньших территорий и предназначены для локальных научных целей или применений.

Операционные центры собирают данные наблюдений с управляемых этими центрами GPS–станций. Как правило, данные в операционные центры поступают во внутренних форматах используемых GPS–приемников. Здесь проверяется качество данных наблюдений, файлы данных переводятся в формат Compact RINEX [48, 49] со стандартным интервалом регистрации сигналов 30 секунд. Эти сжатые файлы по Интернету пересылаются в региональные и локальные центры сбора данных. Некоторые станции выполняют функции операционных центров сами для себя.

Региональные центры сбора данных (табл. 1.7) предназначены для сбора и хранения данных наблюдений с GPS–станций, находящихся в некотором отдельном регионе. Региональные центры получают данные с операционных центров, локальных центров сбора данных или непосредственно с GPS–станций и переправляют их в один из глобальных центров сбора данных.

Таблица 1.7

Центры сбора и анализа данных IGS

Региональные центры сбора данных	AUSLIG, BKG, JPL, NOAA, NRCan
Глобальные центры сбора данных	CDDIS, IGN, SIO
Центры анализа данных (трехсимвольный код)	CODE (COD), NRCan (EMR), ESA/ESOC (ESA), GFZ (GFZ), JPL (JPL), NGS (NGS), SOPAC SIO (SIO)
Дополнительные центры анализа данных	NCL GNAAC, MIT, JPL GNAAC

Три глобальных центра сбора данных (табл. 1.7) собирают файлы наблюдений со всех станций сети IGS. Эти файлы доступны в режиме "on-line" как минимум в течение 30 дней. Результаты обработки, сгенерированные центрами анализа данных IGS и координатором центров анализа, также хранятся в глобальных центрах сбора данных и доступны в режиме "on-line" по крайней мере в течение 1 года. Любой пользователь имеет доступ ко всем этим файлам через анонимный ftp.

Центры анализа данных (табл. 1.7) непрерывно получают и обрабатывают данные наблюдений GPS-спутников. В результате обработки получают эфемериды GPS-спутников, ПВЗ, координаты и скорости GPS-станций, поправки к часам GPS-спутников, а также предсказанные орбиты GPS-спутников.

Дополнительные центры анализа данных (табл. 1.7) суть организации, получающие в результате обработки какой-либо специальный продукт, например, параметры ионосферы, координаты и скорости GPS-станций для какой-то глобальной или региональной подсети и т.д.

Роль координатора центров анализа данных состоит в объединении продуктов центров анализа в единый официальный продукт IGS. Кроме этого он работает в контакте с IERS для получения координат и скоростей GPS-станций в системе ITRF, а также для вычисления ПВЗ.

Координацию работы и управление IGS осуществляет Центральное бюро [66]. В соответствии с политикой и директивами Международного управляющего совета Центральное бюро устанавливает стандарты IGS, осуществляет мониторинг качества данных и продуктов IGS, ведет документацию, подготавливает отчеты, съезды и семинары. Одной из важных обязанностей Центрального бюро является поддержка Информационной системы Центрального бюро IGS — хранилища всей информации, относящейся к IGS, и доступной по Интернету. Центральное бюро находится в JPL (г. Пасадена, Калифорния, США).

Международный управляющий совет осуществляет общий контроль за деятельностью IGS, включая изменения ее структуры. Большинство решений управляющего совета принимаются при достижении консенсуса или простым

голосованием. Международный управляющий совет собирается по крайней мере один раз в год.

1.6.3. Продукты IGS. В настоящее время официальными продуктами IGS являются

- высокоточные эфемериды GPS–спутников;
- параметры вращения Земли;
- координаты и скорости GPS–станций сети IGS;
- поправки к часам GPS–спутников и GPS–станций сети IGS;
- ионосферная информация;
- тропосферная информация.

Точности некоторых продуктов IGS приведены в табл. 1.8 [86].

Таблица 1.8

Точность продуктов IGS

Эфемериды GPS–спутников	10–30 см
Поправки к часам GPS–спутников	0,5–5,0 нс
Координаты полюса	$(0,2–0,7) \cdot 10^{-3}$ сек дуги
Продолжительность суток	0,1–0,5 мс/сут
Координаты станций (годовое решение)	3–30 мм

Указанной точности этих продуктов достаточно для их использования в различных областях научных исследований, а именно для

- реализации и улучшение Международной земной системы отсчета (ITRF);
- мониторинга деформаций твердой Земли;
- мониторинга вращения Земли;
- мониторинга изменений в гидросфере (уровень моря, ледяной покров и т.д.);
- определения орбит спутников;

- мониторинга состояния ионосферы;
- исследования климата, предсказания погоды.

ГЛАВА 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GPS–ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕГИОНАЛЬНОЙ И ЛОКАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ

2.1. Создание перманентной GPS–сети в Украине как региональной части IGS

В последние годы GPS стала основной принятой технологией для разных целей от навигации в реальном времени до высокоточного мониторинга динамики земной коры. Для достижения требуемой точности во многих случаях используется метод относительного определения местоположения, который исключает или уменьшает влияние орбитальных ошибок, атмосферных рефракций или селективного доступа [53]. В этом случае необходимо наличие наблюдений GPS–спутников на пунктах с хорошо известными координатами. Такими пунктами, в частности, являются перманентные GPS–станции.

В настоящее время на территории Украины существуют три перманентных GPS–станции (рис. 2.1): GLSV (Голосеево, г. Киев), UZHL (г. Ужгород) и EVPA (г. Евпатория) [13]. Все они созданы ГАО НАН Украины в ходе выполнения Государственной программы "Создание и развитие Государственной службы единого времени и эталонных частот, 1995–1999 гг." [4]. Станции Голосеево и Ужгород входят в международные сети IGS и EUREF, станция Евпатория будет включена в эти сети после установки Internet–связи. Общая информация об украинских перманентных станциях приведена в табл. 2.1.

На станции Голосеево есть возможность подключения внешнего стандарта частоты (Рубидиум, 5 МГц). GPS–приемник, установленный на этой станции, имеет опцию RTCM Output, что делает возможным использование станции Голосеево в качестве базовой станции в режиме DGPS.



Рис. 2.1. Украинская сеть permanentных станций спутниковой геодезии

Согласно требованиям IGS [45] и EUREF в отношении режима работы permanentных GPS–станций наблюдения организованы следующим образом:

- начало сессий в 00:00 UTC каждые сутки;
- конец сессий в 23:59 UTC каждые сутки;
- интервал регистрации сигналов от GPS–спутников: 30 секунд, начиная с секунды "0";
- минимальный угол места для наблюдаемых спутников: $+5^\circ$.

Работа GPS–станций полностью автоматизирована. Управление осуществляется программой–менеджером GGPS. GGPS представляет собой набор сценариев интерпретатора команд Bourne Again Shell операционной системы Linux, которые формируют команды управления GPS–приемником и файлами данных наблюдений. При этом используются так называемые

Таблица 2.1

Общая информация об украинских перманентных станциях

Станция	Голосеево (GLSV)	Ужгород (UZHL)	Евпатория (EVPA)
Номер DOMES	12356M001	12301M001	—
Место расположения	ГАО НАН Украины, г. Киев	Лаборатория космических исследований УжГУ, г. Ужгород	Национальный центр управления и испытаний космических средств, г. Евпатория–19
Дата установки	16.12.1997	05.02.1999	13.10.1999
Носитель координат	Пересечение верхней поверхности стального столба на крыше главного оффиса с его вертикальной осью	Пересечение верхней поверхности стального столба на крыше главного оффиса с его вертикальной осью	Пересечение верхней поверхности забетонированно–го стального столба с его вертикальной осью
Приемник/антенна	TRIMBLE 4000SSI / TRM29659.00 (дизайн Choke Ring)		
Центры обработки и анализа данных, которые использу– ют данные наблю– дений станции	COD(IGS,EUREF), SIO (IGS), BKG (EUREF), WUT (EUREF)	WUT (EUREF), GOP (EUREF), OLG (EUREF)	—

R–утилиты фирмы Trimble Navigation Ltd, программа преобразования разных бинарных форматов данных в формат RINEX [46, 47] и проверки качества полученных данных teqc [39], программа преобразования данных из формата RINEX в формат Compact RINEX [48, 49].

GGPS запускается каждые сутки в 23:59 UTC и выполняет следующие операции:

- задает условия следующей сессии наблюдений;
- включает таймер GPS–приемника для старта следующей сессии;
- пересылает файл данных наблюдений из приемника в компьютер;
- преобразовывает файл данных из внутреннего формата в формат RINEX;
- пересылает файл данных во внутреннем формате в архив, а RINEX–файл, сжатый программой compress — на ftp–сервер ГАО НАН Украины;
- выполняет проверку качества данных наблюдений;
- преобразовывает файл данных из формата RINEX в формат Compact RINEX;
- пересылает полученный файл на ftp–сервер Регионального центра сбора данных IGS (BKG, г. Франкфурт–на–Майне, Германия).

В ближайшее время ГАО НАН Украины планирует установить еще две перманентные GPS–станции: в Харькове (Харьковский государственный НИИ метрологии) и в Полтаве (Полтавская гравиметрическая обсерватория). В перспективе в ГАО НАН Украины, которая имеет комплекс обработки GPS–наблюдений Bernese GPS Software Version 4.2 [71], может быть создан центр обработки и анализа GPS–данных с украинских перманентных станций в комплексе с данными с зарубежных станций.

2.2. Проведение GPS–наблюдений на Крымском геодинимическом полигоне и анализ их результатов

2.2.1. Описание полигона. Крымский геодинимический полигон расположен на южном побережье Крымского полуострова в районе поселков Симеиз и Качивели (в 50 км на восток от г. Севастополь и 30 км на юго–запад от г. Ялта). На Рис. 2.2 показано расположение основных пунктов этого полигона. Прежде всего здесь находятся две станции ЛЛС типа “Крым–3” [78] 1873 Simeiz (номер DOMES 12337S003) и 1893 Katsively (12337S006), абсолютный и относительные

гравиметрические пункты, радиотелескоп РТ–22 (номер CDP 7332, номер DOMES 12337S008), который после оборудования летом 1994 г. широкополосной системой регистрации радиосигналов MARK III был включен в международную сеть, проводящую РСДБ–наблюдения. Недалеко от РТ–22 находится водомерный пост. Наблюдения уровня Черного моря проводятся на нем непрерывно более 50 лет. Пункт, обозначенный на Рис. 2.2 как SIME, является грунтовым маркером, к которому осуществлялась привязка референцной точки мобильной станции ЛЛС в октябре–ноябре 1991 г. (номер CDP 7561, номер DOMES 12337M001) [78]. Дополнительные маркеры вокруг него обозначены как SZE1 (восточный), SZE2 (юго–восточный), SZE3 (юго–западный) и SZE4 (западный). На территории полигона находится также ряд других грунтовых маркеров, заложенных со следующими целями:

- создание локальной сети для мониторинга движений земной коры с помощью GPS–наблюдений и традиционных геодезических линейно–угловых и высотных измерений;
- привязка референчных точек станций ЛЛС и радиотелескопа к грунтовым реперам с помощью линейно–угловых измерений;
- привязка нуль–метки водомерного поста к международной геоцентрической системе отсчета с помощью нивелирования и GPS–наблюдений.

Через данный полигон ранее были проложены ходы Государственной полигонометрии второго класса и Государственного нивелирования первого класса. Пункты и реперы названных ходов использовались как исходные для построения линейно–угловой и высотной геодезических сетей, общих для всего полигона. Так был проложен ход нивелирования второго класса и высокоточного тригонометрического нивелирования по маршруту "площадка 1893 Katsively — площадка водомерного поста — площадка РТ–22" [11].

Крымский геодинамический полигон является комплексным полигоном, на котором исследуются особенности геодинамики этого сейсмоактивного района Крыма. Наличие на этом полигоне различных инструментов

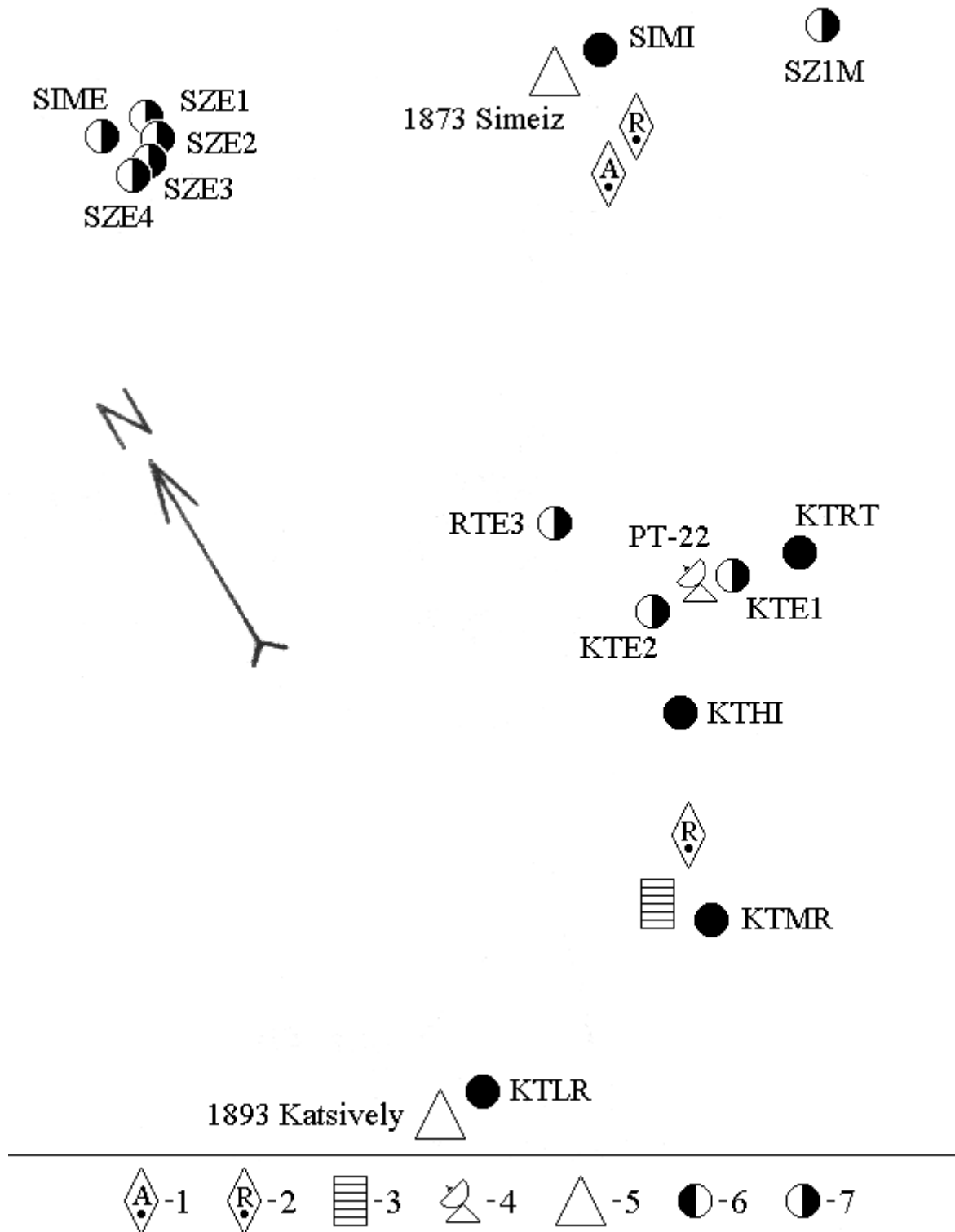


Рис. 2.2. Крымский геодинимический полигон (1 — абсолютный гравиметриче-ский пункт, 2 — относительный гравиметрический пункт, 3 — водомерный пост, 4 — PT-22, 5 — станция ЛЛС, 6 — пункт GPS-кампании РЕКА-93, 7 — пункт GPS-кампании РЕКА-94)

спутниковой геодезии позволяет сравнить результаты различных методов наблюдений.

Кроме лазерной локации ИСЗ и наблюдений удаленных радиоисточников с помощью РТ–22 в рамках кампаний РСДБ–наблюдений в последние годы на этом полигоне были проведены высокоточные геодезические измерения [11] и ряд кампаний наблюдений GPS–спутников, в том числе РЕКА–93 [1, 18, 35, 80] и РЕКА–94 [1, 31].

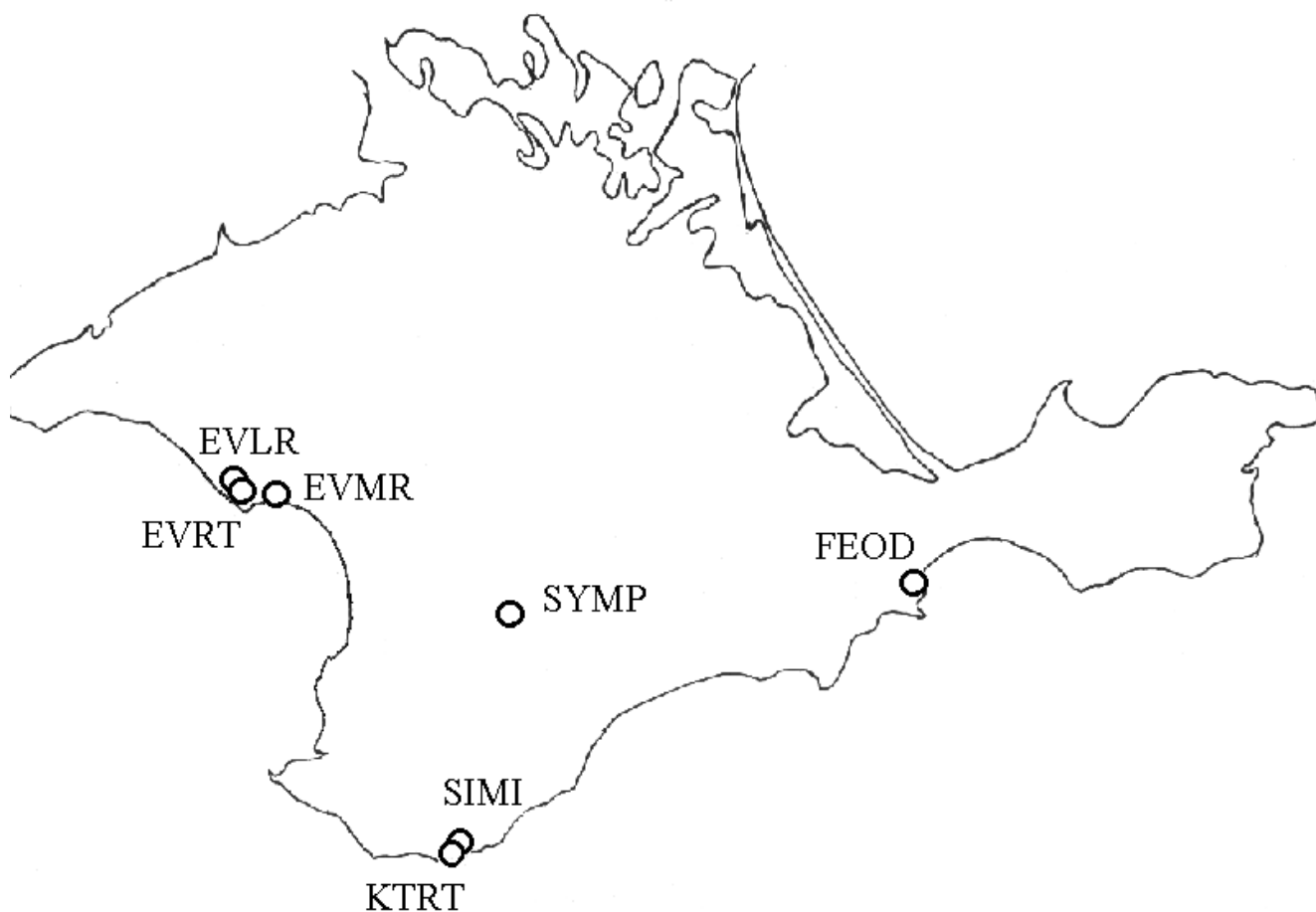


Рис. 2.3. Пункты GPS–кампании РЕКА–93 на территории Украины

2.2.2. GPS–кампания РЕКА–93. GPS–кампания РЕКА–93 проводилась с 29 июня по 3 июля 1993 г. в рамках международных проектов WEGENER и SELF совместно IfAG (г. Франкфурт–на–Майне, Германия), ГАО НАН Украины (г. Киев) и ИПА РАН (г. Санкт-Петербург, Россия). Целью этой кампании было определение точных геоцентрических координат водомерных постов на северном побережье Черного моря и мониторинг геодинамических процессов в районе Кавказских гор.

Наблюдения проводились круглосуточно с интервалом регистрации 15 секунд и минимальным углом места для наблюдаемых GPS–спутников $+10^\circ$ на 31 пункте, шесть из которых расположены около водомерных постов. Для наблюдений в Крыму использовались 4 GPS–приемника Trimble 4000 SSE, предоставленных IfAG. На рис. 2.2–2.3 показаны пункты GPS–кампании РЕКА–93 на территории Украины, а в табл. 2.2 — сессии наблюдений.

Таблица 2.2

Сессии GPS–кампании РЕКА–93 (UTC)

Пункт	Дата (день года)				
	29.06 (180)	30.06 (181)	01.07 (182)	02.07 (183)	03.07 (184)
FEOD	6:00–21:23	06:00–06:00	06:30–06:00	06:35–06:00	06:30–06:00
SIMI	05:58–06:01	06:57–06:00	06:26–06:00	06:26–06:00	06:27–06:00
KTMR				06:48–06:00	
KTRT			07:20–06:00		
KTLR	06:16–06:00	06:30–06:00			
KTHI					07:07–06:00
EVMR	06:00–16:20			07:48–06:00	
EVRT		09:12–06:00			
EVLR			07:29–06:00		
SYMP					09:21–06:00

Полученные данные наблюдений GPS–спутников были обработаны в IfAG [1, 18] с помощью комплекса Bernese v.3.4 [24] и в ИПА РАН [3] с помощью комплекса Bernese v.4.0 [71]. Внутренняя точность решения составила 5 мм по широте и долготе и около 10 мм по высоте.

2.2.3. GPS–кампания РЕКА–94. GPS–кампания РЕКА–94 в рамках международных проектов WEGENER и SELF состоялась 5–10 сентября 1994 г. Целью данной кампании было проведение повторных наблюдений GPS–спутников на пунктах GPS–кампании РЕКА–93 в Крыму и на Северном Кавказе. Для наблюдений в Крыму IfAG предоставил один GPS–приемник Trimble 4000 SSE, который был установлен на пункте SIME (маркер мобильной станции ЛЛС). Наблюдения проводились круглосуточно с интервалом регистрации 15 секунд и минимальным углом места для наблюдаемых GPS–спутников $+13^\circ$.

ГАО НАН Украины совместно с УкрАГП одновременно с этими наблюдениями провела GPS–кампанию на территории Крымского геодинимического полигона с помощью дополнительных двух GPS–приемников Trimble 4000 SSE. Схема расположения пунктов кампании РЕКА–94 представлена на рис. 2.2, диаграмма сессий приведена в табл. 2.3.

Для независимой проверки была проведена локальная коллокация GPS–приемников на платформе мобильной станции ЛЛС (пункты SZE1–SZE4). Расстояния между маркерами на этой платформе были измерены стальной рулеткой. Точность измерений составила 1 мм, так как поверхность платформы не была плоской. Результаты измерений приведены в табл. 2.4.

Обработка наблюдений GPS–кампании РЕКА–94, проведенных в Крыму, выполнена автором в ГАО НАН Украины с помощью комплекса Bernese v.3.5 [24]. При обработке использовались данные наблюдений со станций IGS MATE (Матера, Италия) и WETT (Веттцелль, Германия), точные орбиты GPS–спутников CODE для GPS–недели 765, имеющие внутреннюю точность 10–20 см.

Таблица 2.3

Сессии GPS–кампании РЕКА–94 (UTC)

Пункт	Дата (день года)				
	05.09 (248)	06.09 (249)	07.09 (250)	08.09 (251)	09.09 (252)
SIME	05:00–06:00	06:54–06:00	06:59–06:00	06:53–06:00	06:19–13:13 13:25–06:00
SIMI	08:15–13:16				06:50–16:00
SZE1	15:05–19:04				
SZE2	18:00–21:59				
SZE3	21:22–01:37				
SZE4	22:55–03:05				
SZ1M					14:14–18:31
KTRT	05:00–05:59 06:09–15:00	06:30–13:30			
KTE1		14:01–18:01			
KTE2			13:59–18:00		
RTE3				14:00–18:00	
KTMR				06:30–16:00	
KTLR			06:45–18:00	06:37–13:00	07:39–11:53
HILL		06:30–18:00	06:30–13:30		

Исходные координаты опорных пунктов [32, табл. Т5] приведены в табл. 2.5, а скорости изменения этих координат [32, табл. Т6, 33, табл. Т6] — в табл. 2.6. Координаты пункта 12337S008 (РТ–22) получены сотрудником ГАО НАН Украины С.Л.Болотиным в результате обработки ряда кампаний РСДБ–наблюдений (Crimea–DSS65–Matera–Medicina–Onsala60–Wettzell) с помощью программного обеспечения SteelBreeze 1.0.1 [2].

Таблица 2.4

Расстояния между маркерами на платформе мобильной станции ЛЛС, измеренные рулеткой (в метрах)

	SZE1	SZE2	SZE3	SZE4
SIME	2,363	4,359	4,290	2,837
	2,364	4,359	4,291	2,837
SZE1		2,853	4,265	3,944
		2,853	4,265	3,944
SZE2			2,701	3,893
			2,700	3,893
SZE3				2,091
				2,091

Переход в систему отсчета ITRF92 на эпоху 1994.7 осуществлялся по следующим формулам:

– для пункта 12337S008

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF93, 1988,0} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF93, 1993,0} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}_{ITRF93, 1993,0} \cdot \langle 1988,0 - 1993,0 \rangle$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1988,0} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF93, 1988,0} + \begin{pmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} D & -R3 & R2 \\ R3 & D & -R1 \\ -R2 & R1 & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF93, 1988,0},$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1994,7} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1988,0} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1988,0} \cdot \langle 1994,7 - 1988,0 \rangle$$

Таблица 2.5

Исходные координаты опорных пунктов

Пункт (с/о, эпоха)	Номер DOMES	Координаты и СКО		
		X, м	Y, м	Z, м
MATE (ITRF92, 1988,0)	12734M008	4641949,8900 0,0060	1393045,1110 0,0060	4133287,1910 0,0060
WETT (ITRF92, 1988,0)	14201S020	4075578,7450 0,0050	931852,5330 0,0050	4801569,9600 0,0050
SIME (ITRF92, 1988,0)	12337M001	3783746,6580 0,0180	2551362,5280 0,0160	4441445,0270 0,0160
PT-22 (ITRF93, 1993,0)	12337S008	3785231,1346 0,0026	2551207,3625 0,0019	4439796,3420 0,0030
1873 Simeiz (ITRF92, 1988,0)	12337S003	3783902,7460 0,0460	2551404,9250 0,0400	4441257,5890 0,0280
1893 Katsively (ITRF92, 1988,0)	12337S006	3785944,9130 0,0520	2550780,5250 0,0400	4439461,5120 0,0290

Таблица 2.6

Скорости изменения координат

Номер DOMES	Пункт	Система отсчета, эпоха	$V_x, \sigma V_x,$ м/год	$V_y, \sigma V_y,$ м/год	$V_z, \sigma V_z,$ м/год
12734	Matera	ITRF92, 1988,0	-0,0217 0,0013	0,0171 0,0011	0,0119 0,0014
14201	Wetzell	ITRF92, 1988,0	-0,0169 0,0009	0,0161 0,0009	0,0092 0,0012
12337	Simeiz-Katsively	ITRF92, 1988,0	-0,0204 0,0070	0,0162 0,0053	0,0059 0,0079
12337	Simeiz-Katzively	ITRF93, 1993,0	-0,0254 0,0067	0,0192 0,0051	0,0100 0,0076

– для остальных пунктов

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1994,7} = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1988,0} + \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{pmatrix}_{ITRF92, 1988,0} \cdot (1994,7 - 1988,0)$$

(параметры перехода между системами отсчета ITRF93 и ITRF92 на эпоху 1988,0 [33, табл. Т7] приведены в табл. 2.7).

Таблица 2.7

Параметры преобразования из системы отсчета ITRF93 в ITRF92
на эпоху 1988,0

Параметр	Значение	СКО
Сдвиг по оси X (Т1), см	0,2	0,1
Сдвиг по оси Y (Т2), см	0,7	0,1
Сдвиг по оси Z (Т3), см	0,7	0,1
Масштабный множитель (D), 10^{-8}	-0,12	0,02
Вращение вокруг оси X (R1), 0,001"	0,39	0,06
Вращение вокруг оси Y (R2), 0,001"	-0,80	0,05
Вращение вокруг оси Z (R3), 0,001"	0,96	0,04

Полученные координаты опорных пунктов в системе ITRF92 на эпоху 1994,7 представлены в табл. 2.8.

Обработка данных наблюдений производилась в три этапа. На первом этапе были определены координаты пункта SIME из треугольника МАТЕ–WЕТТ–SIME. Решение было получено путем использования линейной комбинации L_3 , координаты пунктов МАТЕ и WЕТТ рассматривались как исходные, фазовые неоднозначности фиксировались с помощью линейной комбинации L_5 (было зафиксировано 87 из 113 неоднозначностей),

Координаты опорных пунктов в системе отсчета ITRF92 на эпоху 1994,7

Пункт	Номер DOMES	Координаты и СКО		
		X, м	Y, м	Z, м
MATE	12734M008	4641949,7446	1393045,2256	4133287,2707
		0,0106	0,0095	0,0111
WETT	14201S020	4075578,6318	931852,6409	4801570,0216
		0,0078	0,0078	0,0100
SIME	12337M001	3783746,5213	2551362,6365	4441445,0665
		0,0502	0,0389	0,0553
PT-22	12337S008	3785231,0933	2551207,3882	4439796,3527
		0,0577	0,0438	0,0653
1873 Simeiz	12337S003	3783902,6093	2551405,0335	4441257,6285
		0,0657	0,0535	0,0599
1893 Katsively	12337S006	3785944,7763	2550780,6335	4439461,5515
		0,0700	0,0535	0,0604

тропосферные параметры определялись каждые 4 часа на всех пунктах. Полученные координаты пункта SIME приведены в табл. 2.9. Разности этих координат с исходными находятся в пределах возможных ошибок.

На втором этапе определялись координаты пунктов Крымского геодинамического полигона. Решения были получены на частотах L_1 и L_2 , использование линейной комбинации L_3 было невозможным из-за высокого уровня шумов для любых линейных комбинаций для баз длиной до 20 км. Координаты пункта SIME, полученные на первом этапе, рассматривались как исходные. Для получения решений использовались модели ионосферы, построенные на четырехчасовых интервалах времени, тропосферные параметры определялись каждые 2 часа для всех пунктов. Было зафиксировано 480 из 486 фазовых неоднозначностей.

Таблица 2.9

Координаты пункта SIME, полученные из GPS–решения, и их разности с исходными

	Координаты и СКО		
	X, м	Y, м	Z, м
GPS–решение	3783746,5148	2551362,6182	4441445,0892
	0,0011	0,0010	0,0012
Разности между исходными координатами и GPS–решением	0,0065	0,0183	-0,0227
	0,0502	0,0389	0,0553

На третьем этапе определялись координаты пунктов на платформе мобильной станции ЛЛС (SZE1–SZE4). Использовались те же принципы обработки данных GPS–наблюдений, что и на втором этапе. Ввиду малости баз тропосферные параметры определялись только для пункта SIME. Были зафиксированы все 130 фазовых неоднозначности.

Финальные решения на частотах L_1 и L_2 показаны в табл. 2.10–2.11. Табл. 2.12 содержит параметры преобразования Гельмерта, полученные путем сравнения этих решений. Значения параметров характерны для сетей такого масштаба.

Используя значения эксцентриситетов между референсными точками станций ЛЛС, радиотелескопа и GPS–маркерами (табл. 2.13), полученные после обработки высокоточных геодезических измерений [11], можно сравнить полученные координаты этих референсных точек с исходными (табл. 2.14–2.15). Видно, что вычисленные координаты РТ–22 в рамках возможных ошибок согласуются с координатами, полученными с помощью метода РСДБ. Расхождения между координатами для станций лазерной локации ИСЗ 1873 Simeiz и 1893 Katsively могут быть объяснены, как было выяснено позже, ошибками калибровки этих станций.

Таблица 2.10

Финальное решение на частоте L₁

Пункт	Координаты и СКО		
	X, м	Y, м	Z, м
KTRT	3785160,9861	2551262,1229	4439789,7310
	0,0004	0,0003	0,0005
SIMI	3783887,5786	2551403,4118	4441266,7604
	0,0005	0,0003	0,0006
HILL	3785378,7402	2551165,2284	4439717,3229
	0,0004	0,0003	0,0005
KTE1	3785206,3267	2551216,2215	4439790,8751
	0,0009	0,0006	0,0010
KTLR	3785924,0028	2550781,6671	4439471,5206
	0,0004	0,0003	0,0005
KTE2	3785234,7821	2551188,8704	4439783,7781
	0,0011	0,0007	0,0011
RTE3	3785220,3187	2551079,0260	4439987,9063
	0,0008	0,0005	0,0008
KTMR	3785620,3812	2551166,2177	4439462,0851
	0,0006	0,0004	0,0007
SZ1M	3783947,7569	2551467,6902	4441194,9895
	0,0013	0,0011	0,0014
SZE1	3783746,2842	2551364,7399	4441444,0753
	0,0004	0,0002	0,0004
SZE2	3783748,2715	2551365,2568	4441442,0946
	0,0004	0,0002	0,0004
SZE3	3783749,6733	2551362,9555	4441442,2089
	0,0004	0,0003	0,0004
SZE4	3783748,7978	2551361,7287	4441443,6551
	0,0004	0,0003	0,0004

Финальное решение на частоте L₂

Пункт	Координаты и СКО		
	X, м	Y, м	Z, м
KTRT	3785160,9847	2551262,1219	4439789,7300
	0,0004	0,0003	0,0005
SIMI	3783887,5790	2551403,4120	4441266,7616
	0,0005	0,0004	0,0006
HILL	3785378,7388	2551165,2272	4439717,3219
	0,0005	0,0003	0,0006
KTE1	3785206,3261	2551216,2213	4439790,8753
	0,0009	0,0007	0,0011
KTLR	3785924,0010	2550781,6670	4439471,5199
	0,0004	0,0003	0,0005
KTE2	3785234,7820	2551188,8715	4439783,7817
	0,0012	0,0007	0,0012
RTE3	3785220,3153	2551079,0242	4439987,9031
	0,0008	0,0006	0,0009
KTMR	3785620,3780	2551166,2158	4439462,0860
	0,0006	0,0004	0,0007
SZ1M	3783947,7676	2551467,6904	4441194,9971
	0,0014	0,0012	0,0015
SZE1	3783746,2801	2551364,7371	4441444,0703
	0,0004	0,0003	0,0005
SZE2	3783748,2669	2551365,2540	4441442,0906
	0,0004	0,0003	0,0004
SZE3	3783749,6699	2551362,9541	4441442,2064
	0,0004	0,0003	0,0005
SZE4	3783748,7955	2551361,7273	4441443,6543
	0,0004	0,0003	0,0005

Таблица 2.12

Параметры преобразования Гельмерта между GPS-решениями
на частотах L_1 и L_2

Параметр	Значение	СКО
Сдвиг по оси X (T1), мм	-0,8	0,8
Сдвиг по оси Y (T2), мм	-0,2	0,8
Сдвиг по оси Z (T3), мм	1,3	0,8
Масштабный множитель (D), мм/км	0,541	0,701
Вращение вокруг оси X (R1), 1"	2,4103	1,1848
Вращение вокруг оси Y (R2), 1"	1,3888	0,6805
Вращение вокруг оси Z (R3), 1"	0,3376	0,2350

Таблица 2.13

Эксцентриситеты референчных точек станций ЛЛС и радиотелескопа

Опорный пункт	Эксцентриситет	Разности и СКО		
		ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1873 Simeiz	SIMI	-14,9030	-1,1760	3,3490
		0,0010	0,0010	0,0010
1893 Katsively	KTLR	-20,6030	1,1530	10,2440
		0,0010	0,0010	0,0010
PT-22	HILL	147,6271	-42,1650	-79,0232
		0,0010	0,0010	0,0010
PT-22	KTRT	-70,1248	54,7323	-6,6146
		0,0010	0,0010	0,0010
PT-22	KTE2	3,6783	-18,5187	-12,5650
		0,0005	0,0005	0,0005
PT-22	KTE1	-24,7748	8,8463	-5,4618
		0,0005	0,0005	0,0005

Таблица 2.14

Разности между исходными координатами референчных точек станций ЛЛС
и радиотелескопа и полученными из GPS–решения на частоте L_1

Опорный пункт	Эксцентриситет	Разности и СКО		
		ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м
1873 Simeiz	SIMI	0,1277	0,4457	0,2171
		0,0657	0,0535	0,0599
1893 Katsively	KTLR	0,1705	0,1194	0,2749
		0,0700	0,0535	0,0604
PT–22	HILL	-0,0198	-0,0052	0,0066
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTRT	-0,0176	-0,0024	0,0071
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTE2	-0,0105	-0,0009	0,0096
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTE1	-0,0082	0,0130	0,0158
		0,0577	0,0438	0,0653

В табл. 2.16 показаны разности расстояний между маркерами на платформе мобильной станции ЛЛС, полученных из GPS–решения и измеренных рулеткой. Видно, что в основном все они лежат в пределах ошибок измерений. Исключения составляют базы, одним из концов которых является маркер SZE3. Скорее всего, эти расхождения объясняются большей ошибкой измерений указанных баз из–за неровности поверхности платформы мобильной станции ЛЛС.

Таблица 2.15

Разности между исходными координатами референчных точек станций ЛЛС
и радиотелескопа и полученными из GPS–решения на частоте L_2

Опорный пункт	Эксцентриситет	Разности и СКО, м		
		ΔX	ΔY	ΔZ
1873 Simeiz	SIMI	0,1273	0,4455	0,2159
		0,0657	0,0535	0,0599
1893 Katsively	KTLR	0,1723	0,1195	0,2756
		0,0700	0,0535	0,0604
PT–22	HILL	-0,0184	-0,0040	0,0076
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTRT	-0,0162	-0,0014	0,0081
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTE2	-0,0104	-0,0020	0,0060
		0,0577	0,0438	0,0653
PT–22	KTE1	-0,0076	0,0132	0,0156
		0,0577	0,0438	0,0653

Таблица 2.16

Разности расстояний между маркерами на платформе мобильной станции ЛЛС, полученных из GPS–решения и измеренных рулеткой (в миллиметрах)

$L_1 \setminus L_2$	SIME	SZE1	SZE2	SZE3	SZE4
SIME		-0,1 -1,1	0,9 0,9	-3,1 -4,1	1,0 1,0
SZE1	-0,3 -1,3		-1,0 -1,0	-3,4 -3,4	0,5 0,5
SZE2	1,7 1,7	0,1 0,1		-4,5 -3,5	0,8 0,8
SZE3	-2,1 -3,1	-4,7 -4,7	-2,9 -3,9		-1,5 -1,5
SZE4	2,0 2,0	0,9 0,9	0,5 0,5	-2,3 -2,3	

2.3. Проведение GPS–наблюдений в рамках проекта GEODUC и анализ их результатов

2.3.1. Карпатский геодинамический полигон. Карпатский регион, охватывающий складчатые Карпаты, предгорные и межгорные прогибы, внутренние массивы и прилегающую часть платформы, относится к тектонически активным зонам Украины. Его современная активность обусловлена процессами формирования Карпат, Закарпатского и Предкарпатского прогибов и проявляется в местной сейсмичности, аномальном тепловом потоке, наличии зон повышенной электропроводности и локальных аномалий вековых вариаций геомагнитного поля [20].

С 1965 г. на территории Закарпатской области начались работы по созданию Карпатского геодинамического полигона (рис. 2.4). Основной целью

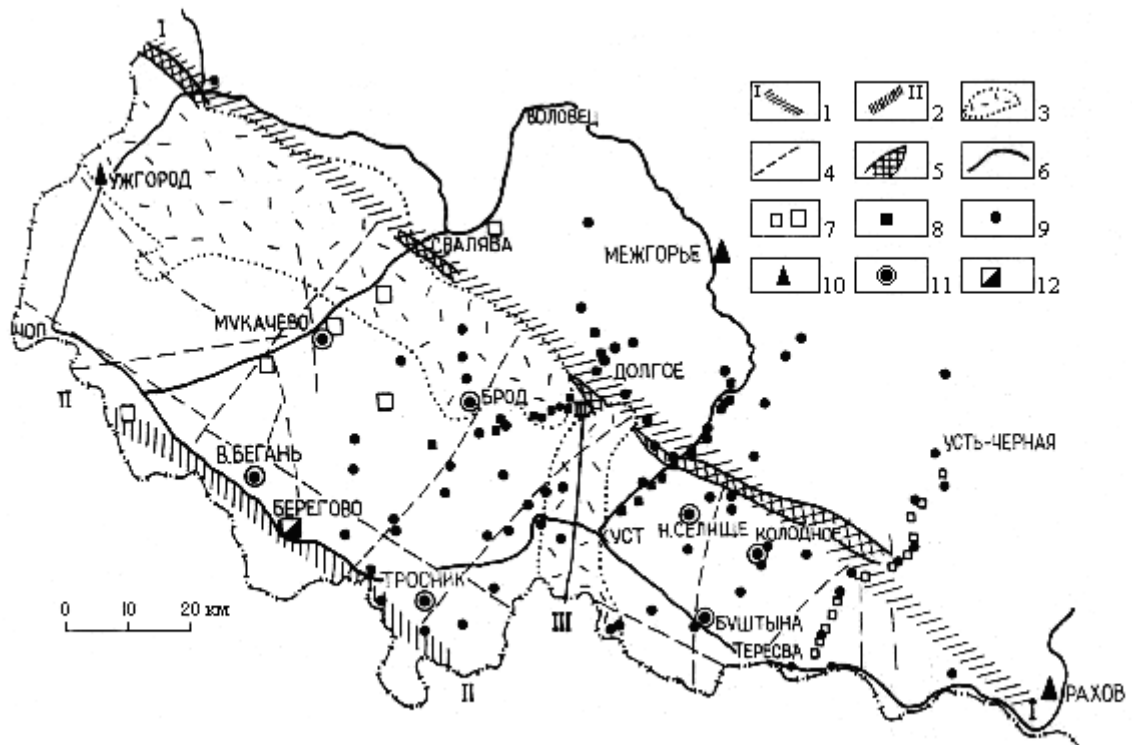


Рис. 2.4. Карпатский геодинамический полигон (1 — Закарпатский глубинный разлом, 2 — Припанонский глубинный разлом, 3 — Вигорлат–Гутинский вулканический хребет, 4 — разломы донеогенового фундамента прогиба, 5 — зона скал, 6 — полигоны повторного нивелирования, 7 — геодезические и гравиметрические реперы, 8 — универсальные реперы, 9 — пункты геомагнитных наблюдений, 10 — региональные сейсмические станции, 11 — режимные геофизические станции, 12 — штольни) [9]

проводившихся на этом полигоне комплексных геофизических и геолого–геоморфологических наблюдений было изучение природы и механизмов современных тектонических процессов, особенностей строения и геодинамики региона на основе временных изменений геофизических полей, полей деформаций и сейсмического режима [8]. С 1981 г. на Карпатском геодинамическом полигоне начались исследования с целью изучения связи временных вариаций геофизических полей с сеймотектоническими процессами и разработки методики поиска предвестников землетрясений. В аномальных зонах, выявленных на территории

полигона, были созданы режимные стационарные геофизические станции и начаты сейсмопрогностические работы силами Карпатского отделения ИГФ НАН Украины. Комплекс геофизических наблюдений включает наблюдения за сейсмическим режимом, геомагнитные, электрометрические, наклономерные, деформационные, акустоэмиссионные наблюдения. Результаты комплексных исследований свидетельствуют о возможности изучения современных геодинамических и сеймотектонических процессов в регионе [5].

Результаты геодезических наблюдений на данном полигоне, являющиеся прямым методом изучения современных локальных и региональных деформаций земной коры, существенно дополняют данные режимных геофизических исследований. Особенно перспективным является использование наблюдений GPS–спутников на опорных станциях, размещенных в пределах Карпатского региона на различных литосферных блоках (проект GEODUC).

2.3.2. GPS–кампания GEODUC'93. Первая кампания GPS–наблюдений в рамках международного проекта геодинамического мониторинга Украинских Карпат GEODUC'93 состоялась в период с 12 по 16 июля 1993 г.

При выборе мест расположения пунктов наблюдений учитывались разломно–блоковая тектоника региона и его современная тектоническая активность [20]. Итоговая схема размещения GPS–пунктов в кампании GEODUC'93 приведена на рис. 2.5. Для изучения движений важнейших блоков земной коры на территории Закарпатья были созданы GPS–пункты в местах размещения существующих сейсмических и комплексных геофизических станций в г. Ужгород (UZHG), г. Берегово (BERG) и с. Нижнее Селище (NSEL). Пункт SEMN расположен недалеко от г. Свалява (с. Семочканя) с целью изучения положения и живучести Закарпатского глубинного разлома и соотношения между современными движениями земной коры Закарпатья и Карпат. На территории Складчатых Карпат создан пункт в с. Славско (SLAV), Подкарпатского прогиба — в г. Моршин (MORN), а на краевой части

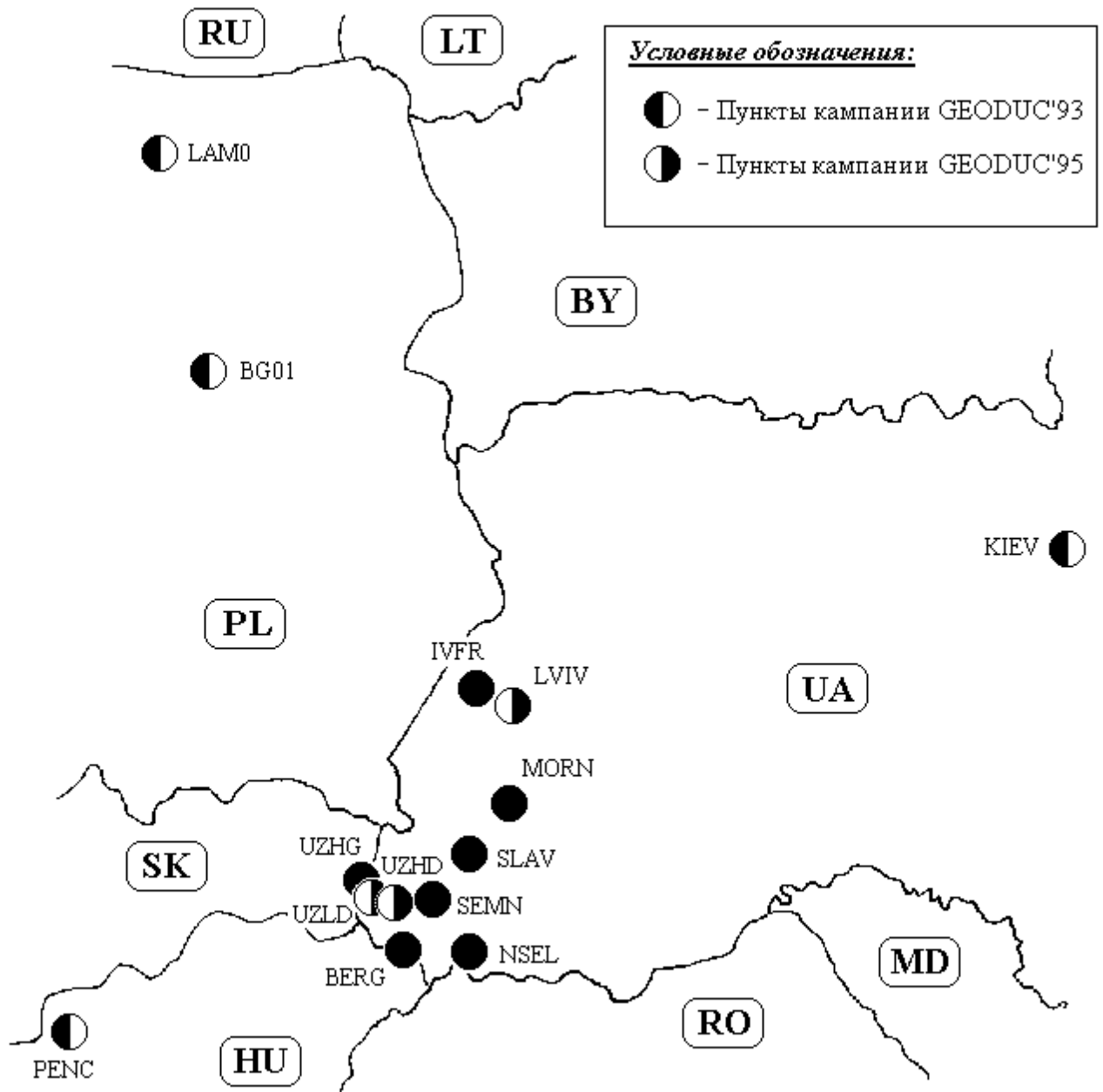


Рис 2.5. Пункты GPS-кампаний GEODUC'93 и GEODUC'95

Восточно-Европейской платформы на территории Львовского палеозойского прогиба — в п. Ивано-Франково (IVFR).

Кроме этих пунктов наблюдения проводились на геодезическом полигоне трилатерации в районе г. Свалява, а также в г. Киев (KIEV), в Польше (BG01, LAMO) и Венгрии (PENC). Для коллокации приемников различных типов использовался дополнительный пункт в с. Семочканя (NSEM).

GPS–кампания проводилась совместно ГАО НАН Украины (г. Киев), Карпатским отделением ИГФ НАН Украины (г. Львов), ЛПИ (г. Львов), УкрАГП (г. Киев), IGGA (г. Варшава, Польша), KGF AR (г. Вроцлав, Польша), IGK (г. Варшава, Польша), IGF ART (г. Ольштын, Польша), SGO (г. Пенч, Венгрия). GPS–приемники были предоставлены польской и венгерской сторонами.

Наблюдения проводились со следующими параметрами:

- начало каждой сессии: 7:00 UTC;
- конец каждой сессии: 17:00 UTC;
- минимальный угол места наблюдаемых GPS–спутников: $+10^\circ$;
- интервал регистрации: 15 секунд.

Список сессий наблюдений приведен в табл. 2.17.

Данные наблюдений GPS–кампании были обработаны сотрудником ГАО НАН Украины И.Ю.Гайовичем во время визита в Центр космических исследований ПАН (г. Варшава, Польша) с помощью комплекса Bernese v.3.4 [24]. Точность определения координат составила [43]:

- для северной компоненты: 4–8 мм;
- для восточной компоненты: 5–10 мм;
- для высотной компоненты: 15–30 мм.

Часть сети кампании GEODUC'93, состоящая из пунктов, где наблюдения проводились с использованием GPS–приемников Ashtech MD–XII была обработана рядом польских институтов [21] с помощью программ GPPS, GEOLAB и комплекса Bernese v.3.4.

Таблица 2.17

Сессии GPS-кампании GEODUC '93 (UTC)

Пункт	Дата (день года)				
	12.07 (193)	13.07 (194)	14.07 (195)	15.07 (196)	16.07 (197)
PENC		07:00–17:00	07:00–17:00		07:00–17:00
BG01	07:15–17:00	07:00–17:00	07:00–17:00	07:00–17:00	07:00–17:00
LAM0	06:50–12:30 12:30–18:47	06:46–12:00 12:00–17:21	06:56–12:00 12:00–17:00	06:56–12:00 12:00–17:03	06:50–12:00 12:00–17:00
BERG	06:55–17:03	06:52–17:04	06:59–17:00	06:50–17:00	06:56–17:03
IVFR	06:59–17:05	06:58–17:05	06:59–17:00	06:57–17:00	07:00–17:00
KIEV	06:45–17:01	06:49–17:00	06:43–17:00	06:49–17:00	06:53–12:00
MORN	06:50–17:00	06:50–17:00	06:50–17:00	06:50–17:00	06:50–17:00
NSEL	06:30–17:00	06:50–17:00	06:50–17:00	06:45–17:00	06:45–17:00
SEMN	07:45–16:55	07:00–17:00	07:00–17:00	07:00–17:00	06:55–17:00
NSEM	07:58–17:00		07:00–17:00	07:00–17:00	06:55–17:00
UZHG	06:50–17:01	06:53–17:01	06:55–17:03	06:55–17:03	06:55–17:01
SLAV	07:00–17:00	07:00–17:00	07:00–17:00	06:50–17:05	06:55–17:00
POGR	08:30–15:00			08:00–17:00	
GOLB	08:20–16:00	06:50–15:00			
ROZH	09:20–16:00		09:00–16:00		
BYST	07:00–16:00		07:00–15:00		
NELP		07:16–15:00	09:26–15:00		06:40–17:00
DAKH				13:31–17:00	06:57–16:00
BRGY				08:30–17:00	07:00–17:00
BUZH					09:14–16:00

2.3.3. GPS–кампания GEODUC'95. Вторая GPS–кампания в рамках украинско–польско–венгерского проекта "Геодинамика Украинских Карпат" GEODUC'95 состоялась 19–24 сентября 1995 г. Целью кампании, организованной ГАО НАН Украины, было проведение повторных измерений расстояний между геодезическими пунктами, расположенными на территории геофизических станций в Украинских Карпатах, а также привязка указанных пунктов к Центрально–Европейской геодинамической опорной GPS–сети (CEGRN [40]), два пункта которой находятся в Западной Украине (недалеко от г. Львов и г. Ужгород). Перечень пунктов кампании приведен в табл. 2.18. и на рис. 2.5.

Для наблюдений использовалось девять двухчастотных GPS–приемников: четыре типа Trimble 4000 SSE, предоставленных УкрАГП (г. Киев), и пять типа Ashtech MD–XII, предоставленных IGF ART (г. Ольштын, Польша) и IGK (г. Варшава, Польша). В кампании также участвовали Карпатское отделение ИГФ НАН Украины (г. Львов) и ДУ "ЛП" (г. Львов)

Наблюдения проводились со следующими параметрами:

- начало сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Trimble:
7:00 UTC;
- конец сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Trimble:
2:00 UTC;
- начало первых сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Ashtech:
7:00 UTC;
- конец первых сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Ashtech:
17:00 UTC;
- начало вторых сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Ashtech:
19:00 UTC;
- конец вторых сессий для пунктов, оборудованных приемниками типа Ashtech: 5:00
UTC;
- минимальный угол места наблюдаемых GPS–спутников: $+10^\circ$;
- интервал регистрации: 15 секунд.

Пункты GPS–кампании GEODUC '95

Пункт	Иденти– фикатор	GPS–приемник	Предыдущие кампании
Берегово	BERG	Trimble 4000 SSE	GEODUC'93
Берегово — Доп. маркер А	BERA	Ashtech MD-XII	
Ивано–Франково	IVFR	Ashtech MD-XII	GEODUC'93
Львов	LVIV	Trimble 4000 SSE	
Львов — Доп. маркер	LVIA	Ashtech MD-XII	Ext. SAGET'93, CEGRN'94, '95
Моршин	MORN	Trimble 4000 SSE	GEODUC'93
Моршин — Доп. маркер В	MORB	Ashtech MD-XII	
Нижнее Селище	NSEL	Ashtech MD-XII	GEODUC'93
Нижнее Селище — Доп. маркер А	NSEA	Trimble 4000 SSE	
Семочканя	SEMN	Trimble 4000 SSE	GEODUC'93
Славско	SLAV	Ashtech MD-XII	GEODUC'93
Славско — Доп. маркер А	SLAA	Trimble 4000 SSE	
Ужгород — Геофизическая станция	UZHG	Ashtech MD-XII	Ext. SAGET'93, GEODUC'93
Ужгород — Станция ЛЛС	UZLD	Ashtech MD-XII	
Ужгород/Деренивка	UZHD	Trimble 4000 SSE	CEGRN'94, '95
Ужгород/Деренивка — Доп. маркер А	UZDA	Ashtech MD-XII	

Список сессий наблюдений приведен в табл. 2.19.

Данные наблюдений GPS–кампании GEODUC'95 были обработаны в ГАО НАН Украины с помощью комплекса Bernese v.3.5 [24]. Обработка проводилась со следующими условиями:

- пункт LVIA использовался как опорный, его координаты были взяты из результатов обработки GPS–кампании CEGRN'94 [81];
- использовались точные орбиты IGS, имеющие внутреннюю точность 10 см, система отнесения для орбитальных данных: ITRF93;
- использовалась стандартная тропосферная модель Саастамойнена с дальнейшей оценкой тропосферных параметров (для пунктов, оборудованных приемниками типа Ashtech — 1 параметр на сессию, для пунктов, оборудованных приемниками типа Trimble — 1 параметр на 2 часа);
- обрабатывались двойные разности, основанные на безионосферной линейной комбинации фаз L_3 ;
- фазовые неоднозначности определялись с использованием параметров ионосферы, полученных из обработки линейной комбинации L_4 .

Качество данных проверялось путем проверки на замкнутость треугольников, образованных базами из одной сессии наблюдений, повторяемости длин баз и координат пунктов из решений для различных сессий. Проверка показала относительно низкое качество данных для станции SLAV, сессия 2632. Эта сессия была исключена из дальнейшей обработки.

Точность полученного финального решения составила [42]:

- для компонент координат:
 - 3 мм для подсети "Trimble";
 - 9 мм для подсети "Ashtech";
- для длин баз:
 - 1–3 мм для подсети "Trimble";
 - 5–10 мм для подсети "Ashtech".

В табл. 2.20–2.21 показаны параметры преобразования Гельмерта между финальным решением и решениями для отдельных сессий. Видно, что подсеть "Trimble" поддерживает масштаб сети на уровне $(0,5–1,0) \cdot 10^{-6}$, а подсеть "Ashtech" — $(1,0–3,0) \cdot 10^{-6}$. Кроме этого, ориентация подсети "Trimble" сохраняется лучше, чем подсети "Ashtech".

Таблица 2.19

Сессии GPS-кампании GEODUC'95 (UTC)

Пункт	Дата (день года)									
	19.09.1995 (262)		20.09.1995 (263)		21.09.1995 (264)		22.09.1995 (265)		23.09.1995 (266)	
LVIV	07:00–03:31		07:00–03:48		07:00–03:46		07:00–03:47		07:00–03:45	
MORN	07:00–02:30		18:15–06:00		07:00–03:10		07:00–03:05			
SEMN	07:00–02:00		06:51–01:55		07:00–02:00		06:56–02:02			
UZHD	06:59–02:04		07:00–02:03							
BERG					07:54–04:38		16:52–06:55		07:14–04:00	
SLAA									07:15–04:00	
NSEA									08:23–04:25	
LVIA	07:00–16:58	19:00–04:25	07:00–17:00	19:00–04:28	07:00–16:58	19:05–04:32	07:00–16:59	18:58–04:28	07:00–16:56	
IVFR	06:38–17:04	18:35–05:05	06:37–17:04	18:40–05:05	06:38–17:03	18:39–05:10				
SLAV	06:40–16:59	18:55–04:48	07:21–17:00	18:55–04:51	07:00–17:00	18:55–04:50	07:06–17:00	18:56–04:54	06:58–17:00	18:57–04:51
UZLD	07:00–17:00									
UZDA		19:00–05:00	07:00–17:00	19:00–05:00						
UZHG	07:03–17:04	18:58–05:00	06:59–17:02	18:59–05:02	07:00–17:03	19:02–05:13	06:58–17:06	19:02–04:57		
NSEL					10:00–17:00	19:00–05:00	06:32–16:57	19:00–5:00	06:45–17:00	19:00–05:00
MORB							09:12–17:22	18:56–05:03	06:35–17:05	18:35–05:07
BERA									08:19–17:04	19:01–04:53
	2621	2622	2631	2632	2641	2642	2651	2652	2661	2662
	Сессия									

В табл. 2.22 приведены разности длин баз для решений GPS–кампаний GEODUC'93 и GEODUC'95. Учитывая, что некоторые разности больше средних квадратичных отклонений побазовых решений, а также происшедшие в Закарпатье осенью и зимой 1998 г. землетрясения и сдвиги почвы, следует сделать вывод о необходимости дальнейших наблюдательных кампаний в этом регионе.

Таблица 2.20

GPS–кампания GEODUC'95. Параметры преобразования Гельмерта для подсети "Trimble"

	День года				
	262	263	264	265	266
Кол–во параметров	7	7	7	7	7
Кол–во координат	12	12	12	12	12
СКО, мм	1,2	1,6	1,9	1,9	1,1
Сдвиг по оси X, мм	$0,5 \pm 0,6$	$-1,5 \pm 0,8$	$0,7 \pm 0,9$	$1,2 \pm 1,0$	$-0,6 \pm 0,4$
Сдвиг по оси Y, мм	$-0,4 \pm 0,6$	$0,5 \pm 0,8$	$0,1 \pm 0,9$	$-0,6 \pm 1,0$	$0,2 \pm 0,4$
Сдвиг по оси Z, мм	$-0,7 \pm 0,6$	$-0,5 \pm 0,8$	$3,3 \pm 0,9$	$-3,8 \pm 1,0$	$1,2 \pm 0,4$
Вращение вокруг оси X, 0,001"	$2,9 \pm 4,8$	$-11,2 \pm 6,4$	$0,4 \pm 11,7$	$24,3 \pm 12,1$	$-24,5 \pm 4,5$
Вращение вокруг оси Y, 0,001"	$-0,5 \pm 3,5$	$7,7 \pm 4,7$	$-6,3 \pm 6,7$	$-1,9 \pm 6,9$	$4,1 \pm 1,9$
Вращение вокруг оси Z, 0,001"	$0,9 \pm 1,6$	$0,2 \pm 2,1$	$0,0 \pm 2,4$	$-0,1 \pm 2,4$	$-0,8 \pm 1,2$
Масштабный множитель, мм/км	$-0,008 \pm$ 0,008	$0,008 \pm$ 0,010	$-0,006 \pm$ 0,012	$-0,006 \pm$ 0,012	$0,008 \pm$ 0,006

Таблица 2.21

GPS–кампания GEODUC'95. Параметры преобразования Гельмерта для подсети
"Ashtech"

	Сессия				
	2621	2622	2631	2641	2642
Кол–во параметров	7	7	7	7	7
Кол–во координат	9	9	9	12	12
СКО, мм	2.3	1.0	1.5	3.3	3.7
Сдвиг по оси X, мм	0,8 ± 1,3	2,2 ± 0,6	-5,2 ± 0,9	-1,2 ± 1,6	1,3 ± 1,8
Сдвиг по оси Y, мм	-0,4 ± 1,3	-0,2 ± 0,6	0,1 ± 0,9	0,4 ± 1,6	0,3 ± 1,8
Сдвиг по оси Z, мм	4,5 ± 1,3	3,1 ± 0,6	14,8 ± 0,9	2,0 ± 1,6	-14,4 ± 1,8
Вращение вокруг оси X, 0,001"	25,2 ± 9,7	-31,1 ± 4,2	-119,5 ± 6,3	18,9 ± 8,8	68,1 ± 9,9
Вращение вокруг оси Y, 0,001"	-25,7 ± 7,9	11,3 ± 3,5	36,5 ± 5,2	-10,7 ± 5,6	-5,0 ± 6,3
Вращение вокруг оси Z, 0,001"	-2,1 ± 3,4	1,2 ± 1,5	-5,6 ± 2,2	0,3 ± 4,0	0,9 ± 4,5
Масштабный множитель, мм/км	-0,002 ± 0,017	-0,016 ± 0,007	0,038 ± 0,011	0,036 ± 0,020	-0,034 ± 0,022

Таблица 2.22

Разности длин баз, полученных из решений GPS–кампаний GEODUC'95 и
GEODUC'93 (в метрах)

	IVFR						
IVFR		UZHG					
UZHG	0,0047		BERG				
BERG	-0,0136	-0,0160		SLAV			
SLAV	0,0016	-0,0146	-0,0228		MORN		
MORN	-0,0139	-0,0019	-0,0098	0,0120		NSEL	
NSEL	-0,0325	0,0250	0,0442	-0,0269	-0,0312		SEMN
SEMN	0,0040	-0,0031	-0,0146	-0,0077	0,0059	0,0113	

2.4. Локальный полигон ГАО НАН Украины

Локальный полигон ГАО НАН Украины (рис. 2.6) находится в южной части г. Киев на территории указанной обсерватории. В состав полигона входят обновленная станция ЛЛС 1824 Kiev [83], астрономический пункт (GLSA), перманентная GPS–станция GLSV [15], пункт GPS–кампаний GEODUC'93 (как KIEV), EUREF–UKR'95, EVLN'97 (как KIEA), ряд дополнительных маркеров и геодезических знаков.

Летом–осенью 1997 г. на данном полигоне были проведены GPS–кампания MAO–LN'97 и высокоточные геодезические измерения. Целью этих наблюдательных кампаний было определение координат главной (или редуцированной) точки станции ЛЛС и перманентной GPS–станции, а также определение локальных привязок на полигоне двумя независимыми методами.

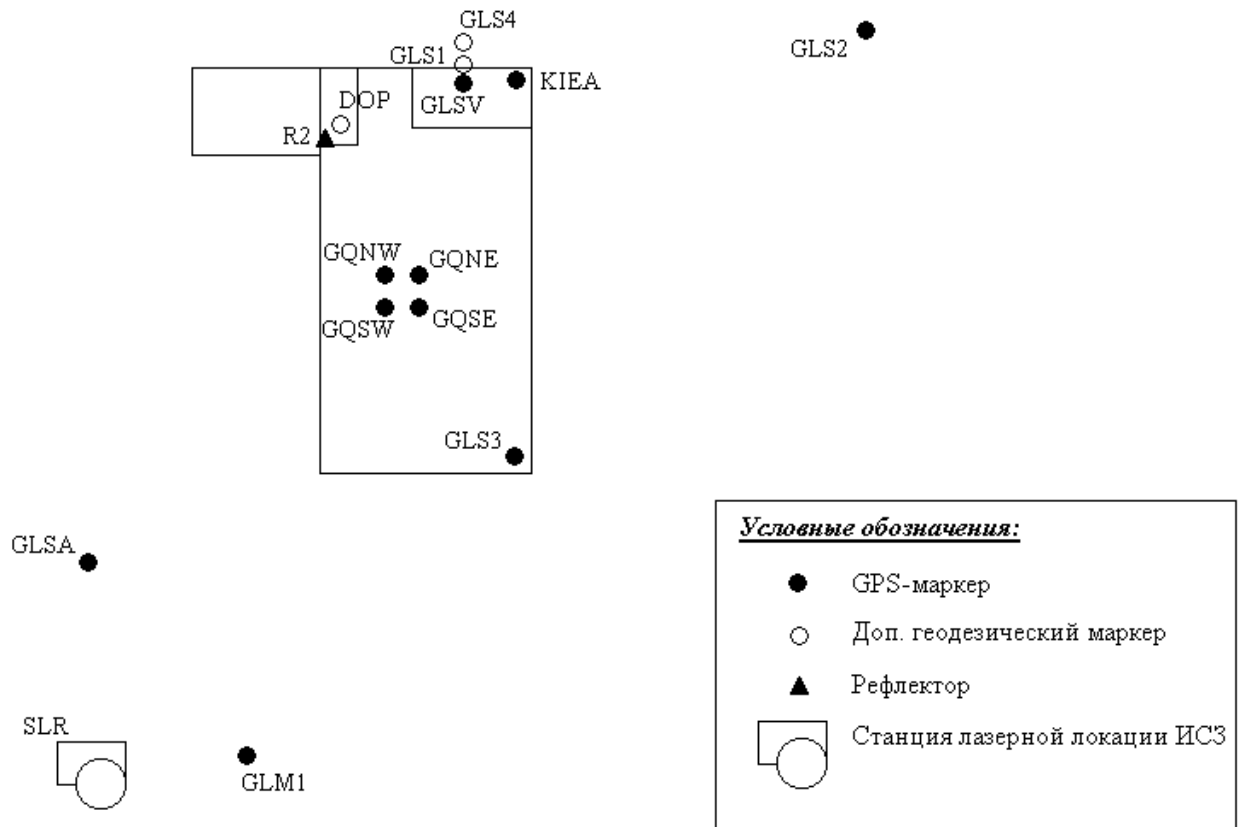


Рис. 2.6. Локальный полигон ГАО НАН Украины

Высокоточные геодезические измерения проводились сотрудниками УкрЦСМ по специальной технологии, разработанной для подобных работ на Крымском геодинамическом полигоне (Симеиз–Кацевели) [11] и в Астрономической обсерватории в Боровце (Польша) [74], со средним квадратичным отклонением, не превышающим 1 мм. Геодезические измерения обрабатывались в УкрЦСМ пакетом прикладных программ АРМИГ (автор В.В.Беляев). В табл. 2.23 приведены координаты станции ЛЛС (SLR) и перменентной GPS–станции GLSV, определенные в ходе этой обработки с точностью 1 мм. Полученные локальные привязки на полигоне ГАО показаны в табл. 2.24.

Таблица 2.23

Координаты главной точки станции ЛЛС 1824 Kiev (SLR) и перменентной GPS-станции GLSV, определенные из высокоточных геодезических измерений (WGS-84, точность 1 мм)

Пункт	X, м	Y, м	Z, м
GLSV	3512889,2751	2068980,6490	4888903,2444
SLR	3512989,8890	2068969,8310	4888817,9321

Таблица 2.24

Локальные привязки (точность 1 мм) и разности координат пунктов на полигоне ГАО НАН Украины между GPS и геодезическим решениями

Пункт	Локальные привязки			Разности между GPS и геодезическим решениями					
	ΔX , м	ΔY , м	ΔZ , м	δX , мм		δY , мм		δZ , мм	
				на L ₁	на L ₂	на L ₁	на L ₂	на L ₁	на L ₂
KIEA	0,0000	0,0000	0,0000	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
GLSV	1,7549	-2,7220	1,7784	1,0	1,4	1,2	2,4	4,6	2,6
GLS2	-53,7650	32,7708	3,4359	1,7	1,7	7,2	6,0	22,6	25,4
GLS3	38,2941	22,9347	-40,4599	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-1,2	-1,0
GQSE	28,7363	11,5879	-29,0652	2,1	1,0	-2,0	-2,4	-1,5	-2,9
GQSW	29,7152	9,8470	-29,1239	-0,1	-0,3	-3,3	-3,6	-3,3	-5,3
GQNE	27,4108	10,8020	-27,7893	0,0	-0,5	-4,0	-4,7	-1,6	-3,1
GQNW	28,3984	9,0632	-27,8382	0,0	-1,2	-0,3	-2,2	-2,1	-4,0
GLSA	69,6146	-26,4831	-59,7985	9,6	10,1	5,9	7,9	29,4	24,9
GLM1	86,2640	-0,8689	-83,6040	1,1	8,4	2,1	4,7	9,8	15,9
SLR	102,3692	-13,5403	-83,5339						
GLS1	0,7328	-3,2875	1,3211						

В процессе обработки был также определен контрольный базис — расстояние между главной точкой станции ЛЛС и отражателем R2, закрепленным на крыше главного корпуса ГАО. В табл. 2.25 представлены дирекционный угол направления SLR–R2, горизонтальное расстояние, разность высот и расстояние SLR–R2.

Таблица 2.25

Контрольный базис (главная точка станции ЛЛС 1824 Kiev — отражатель R2)

Дирекционный угол	24°13'10,53"
Горизонтальное расстояние	120,5033 м
Разность высот	11,1666 м
Расстояние	121,0196 м

GPS–кампания MAO–LN'97 состоялась 20–22 августа 1997 г. Наблюдения проводились на 10 пунктах (рис. 2.6) с временем регистрации 15 секунд и минимальным углом места наблюдаемых GPS–спутников $+10^\circ$. Использовались пять приемников Trimble 4000 SSi, принадлежащих ГАО НАН Украины. Во время кампании было проведено четыре сессии наблюдений длительностью приблизительно по четыре часа каждая (табл. 2.26).

Обработка полученных данных была проведена в ГАО НАН Украины комплексом Bernese v.3.5 [24] с использованием следующих принципов:

- пункт КИЕА считался опорным, его координаты были взяты из результатов GPS–кампании GEODUC'93 [43] и преобразованы из системы ITRF91 в систему WGS–84;
- использовались бортовые эфемериды GPS–спутников;
- использовалась стандартная тропосферная модель Саастамойнена с дальнейшей оценкой тропосферных параметров (1 параметр на каждые 2 часа);

Таблица 2.26

Сессии GPS–кампании МАО–LN'97 (UTC)

Пункт	Сессия 2321	Сессия 2331	Сессия 2341	Сессия 2342
	20.08.1997	21.08.1997	22.08.1997	22.08.1997
KIEA		06:25–10:20	06:09–10:29	
GLSV	06:46–12:36	06:01–11:44		
GLS2	08:19–12:21			11:07–15:10
GLS3		07:11–11:15	05:44–10:24	
GQSE			05:44–10:24	10:49–15:32
GQSW	07:04–12:41	06:12–11:14		
GQNE	07:09–12:38			10:54–15:32
GQNW	07:09–12:40			
GLSA			06:47–08:55	10:32–15:10
GLM1		06:46–11:13	06:22–10:24	

- GPS–наблюдения обрабатывались на частотах L_1 и L_2 ;
- фазовые неоднозначности фиксировались.

Качество данных проверялось путем проверки повторяемости длин баз из решений для отдельных сессий и замкнутости треугольников, образованных базами из одной сессии наблюдений.

Финальное решение на частотах L_1 и L_2 [41] приведено в табл. 2.27, а табл. 2.28 содержит параметры преобразования Гельмерта между этими решениями. Видно, что точность определения координат пунктов локальной сети составляет 0,1–1,1 мм.

Таблица 2.27

GPS–кампания MAO–LN'97. Финальное решение (WGS–84, координаты пункта КИЕА фиксированы)

Пункт	Решение на частоте L ₁ (координаты и СКО)			Решение на частоте L ₂ (координаты и СКО)		
	X, м	Y, м	Z, м	X, м	Y, м	Z, м
КИЕА	3512887,5200 0,0000	2068983,3710 0,0000	4888901,4660 0,0000	3512887,5200 0,0000	2068983,3710 0,0000	4888901,4660 0,0000
GLSV	3512889,2901 0,0002	2068980,6560 0,0004	4888903,2630 0,0003	3512889,2897 0,0005	2068980,6544 0,0008	4888903,2610 0,0006
GLS2	3512833,9333 0,0005	2069016,2380 0,0003	4888905,1445 0,0007	3512833,9269 0,0004	2069016,2360 0,0003	4888905,1373 0,0006
GLS3	3512925,8131 0,0002	2069006,3054 0,0001	4888861,0049 0,0002	3512925,8133 0,0003	2069006,3056 0,0002	4888861,0051 0,0004
GQSE	3512916,2581 0,0002	2068994,9570 0,0001	4888872,3993 0,0002	3512916,2570 0,0004	2068994,9566 0,0002	4888872,3979 0,0005
GQSW	3512917,2349 0,0001	2068993,2147 0,0001	4888872,3388 0,0002	3512917,2347 0,0003	2068993,2144 0,0002	4888872,3368 0,0004
GQNE	3512914,9310 0,0001	2068994,1690 0,0001	4888873,6751 0,0002	3512914,9305 0,0002	2068994,1683 0,0002	4888873,6736 0,0003
GQNW	3512915,9180 0,0001	2068992,4337 0,0001	4888873,6257 0,0002	3512915,9168 0,0003	2068992,4318 0,0002	4888873,6238 0,0004
GLSA	3512957,1626 0,0005	2068956,9119 0,0004	4888841,6969 0,0007	3512957,1591 0,0008	2068956,9119 0,0006	4888841,6924 0,0011
GLM1	3512973,7851 0,0004	2068982,5041 0,0003	4888817,8718 0,0006	3512973,7924 0,0004	2068982,5067 0,0002	4888817,8779 0,0005

Разности между GPS–решением и координатами, полученными из обработки геодезических измерений, показаны в табл. 2.24. Эти разности содержат как ошибки геодезических измерений, так и ошибки GPS–измерений. Большие значения разностей для пунктов GLS2, GLSA и GLM1 могут быть объяснены ограниченной видимостью GPS–спутников на этих пунктах (из–за деревьев и близстоящих строений). Для остальных пунктов локального полигона, находящихся на крыше главного корпуса обсерватории, разности составляют для решения на частоте L_2 (L_1) 0,3–1,4 мм (1,0–2,0 мм) по осям X и Y, 1,0–4,0 мм (1,5–4,6 мм) по оси Z.

Таблица 2.28

GPS–кампания MAO–LN'97. Параметры преобразования Гельмерта между финальными решениями на частотах L_1 и L_2

Количество параметров	7
Количество координат	30
СКО, мм	2,3
Сдвиг по оси X, мм	$0,4 \pm 0,7$
Сдвиг по оси Y, мм	$-0,1 \pm 0,7$
Сдвиг по оси Z, мм	$1,5 \pm 0,7$
Угол поворота вокруг оси X, 0,001"	$-2,87 \pm 8,48$
Угол поворота вокруг оси Y, 0,001"	$18,86 \pm 6,50$
Угол поворота вокруг оси Z, 0,001"	$-0,20 \pm 3,27$
Масштабный множитель, мм/км	$-10,44 \pm 15,50$

2.5. Выводы

Данная глава посвящена использованию GPS-технологии на региональных и локальных полигонах. Приведены описания Крымского и Карпатского геодинамических полигонов.

На территории Крымского геодинамического полигона были проведены украинские части международных кампаний GPS-наблюдений РЕКА-93 и РЕКА-94. Одновременно с кампанией РЕКА-94 была организована GPS-кампания с целью определения локальных привязок на этом полигоне. В результате обработки данных наблюдений GPS-спутников во время этой кампании автором были получены координаты пунктов полигона с внутренней точностью решения 1,0–1,5 мм. Координаты маркера мобильной станции ЛЛС и РТ-22, вычисленные из GPS-решения с учетом эксцентриситетов, полученных из высокоточных геодезических измерений, совпадают с координатами из решений ITRF92 и ITRF93 в пределах ошибок вычислений. Расхождения аналогичных координат для двух станций ЛЛС могут быть объяснены ошибками калибровки этих станций.

В рамках международного украинско-польско-венгерского проекта "Геодинамика Украинских Карпат" были проведены две кампании наблюдений GPS-спутников GEODUC'93 и GEODUC'95. В результате обработки данных GPS-кампании GEODUC'95 были получены повторные координаты пунктов данного проекта. Ошибки определения координат составили 3 мм (9 мм), ошибки определения длин баз — 1–3 мм (5–10 мм) для приемников типа "Trimble" ("Ashtech").

Учитывая, что некоторые разности длин баз для решений GPS-кампаний GEODUC'93 и GEODUC'95 больше средних квадратичных отклонений побазовых решений, а также происшедшие в Закарпатье осенью и зимой 1998 г. землетрясения и сдвиги почвы, следует сделать вывод о необходимости дальнейших наблюдательных кампаний в этом регионе.

На локальном полигоне ГАО НАН Украины была проведена GPS–кампания MAO–LN'97. Из обработки данных этой кампании были получены координаты будущей (на тот момент) перманентной GPS–станции GLSV, астрономического пункта и других маркеров с точностью 0,1–1,1 мм. Разности координат, полученных из GPS–решения и обработки высокоточных геодезических измерений, для пунктов с хорошей видимостью GPS–спутников находятся в пределах ошибок вычислений.

В ходе выполнения Государственной программы "Создание и развитие Государственной службы единого времени и эталонных частот, 1995–1999 гг." с целью привязки координатной системы Украины к Международной земной системе отсчета на территории страны установлены три перманентные GPS–станции: GLSV (Голосеево, г.Киев), UZHL (г.Ужгород) и EVPA (г.Евпатория). Станции Голосеево и Ужгород включены в международные сети IGS и EUREF. Режим работы всех трех станций соответствует требованиям этих организаций. Работа станций полностью автоматизирована с помощью разработанных алгоритмов и программ.

ГЛАВА 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ GPS–ТЕХНОЛОГИИ

3.1. Ионосфера: состав, модели

Ионосферой называется ионизированный слой верхней атмосферы Земли (приблизительно 50–500 км). Она состоит из положительных ионов (в основном O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ , He^+ и H^+) и электронов, "оторванных" при ионизации атомов. В нижней ионосфере, где ионизация мала, а плотность нейтральных частиц велика, существуют также отрицательные ионы, образующиеся в результате "прилипания" лишнего электрона к нейтральной частице.

Согласно модели Чепмена ионосферу принято делить на области (слои) D, E и F (рис. 3.1) [6].

Слой D (приблизительно 50–90 км) характеризуется слабой ионизацией и соответственно небольшой концентрацией заряженных частиц, монотонно увеличивающейся с высотой. Среднее дневное значение электронной концентрации на высоте 90 км $N_e \approx 10^4 \text{ см}^{-3}$ [76]. Газы в области D ионизируются рентгеновским излучением Солнца, кроме того некоторую роль играют дополнительные слабые источники ионизации: сгорающие на высотах 60–100 км метеоры, космические лучи, а во время магнитных бурь — энергичные частицы магнитосферного происхождения. Ночью ионизация в слое D резко уменьшается, но не исчезает полностью. Ионная и электронная температуры в области D совпадают с температурой нейтральной атмосферы и приблизительно равны 200 К.

Область E (90–140 км) характеризуется ростом концентрации электронов с высотой в дневное время, связанным с поглощением солнечного коротковолнового излучения. В дневное время на высотах около 110 км наблюдается максимальная концентрация электронов ($N_e \approx 10^5 \text{ см}^{-3}$ [6]). Ночью концентрация электронов в этой области уменьшается до 10^3 см^{-3} . Это связано

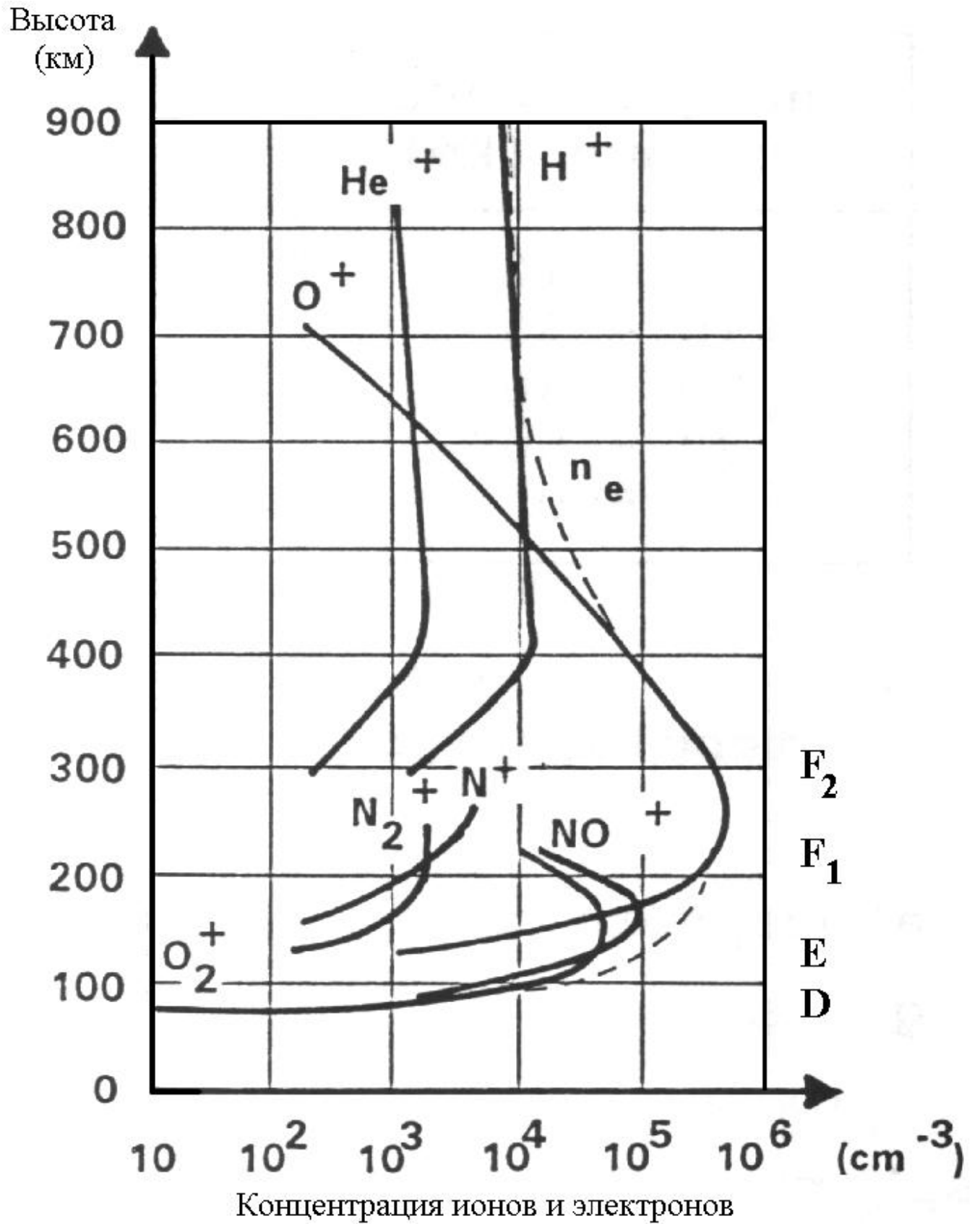


Рис. 3.1. Средняя концентрация ионов и электронов в дневной ионосфере [79]

с тем, что процессы рекомбинации не успевают охватить все долгоживущие ионы (O^+ , Ca^+ , Fe^+ , Si^+ , "метеорные" ионы и другие). Кроме того, некоторое количество ионов поступает в область E сверху из области F, где рекомбинация идет медленнее, и концентрация ионов относительно велика. Определенную роль в ионосфере средних широт играют также ночные источники ионизации — поглощение рассеянного геокоороной излучения Солнца в линии L_{α} , метеорная ионизация, космические лучи, а при больших магнитных бурях — энергичные нейтральные атомы, образующиеся при процессах перезарядки заряженных частиц пояса кольцевого тока в магнитосфере с атомами геокоороны. Последний процесс во время магнитной бури становится особенно важен для существования ночной области E на низких широтах. Максимальная электронная температура в этой области приблизительно равна 300 К, а ионная — на несколько десятков градусов меньше.

Областью F называют теперь всю ионосферу выше 130–140 км. Максимум ионообразования под действием солнечного коротковолнового излучения лежит на высотах 150–200 км. Однако ионы до момента рекомбинации на больших высотах живут сравнительно долго, а процессы диффузии приводят к тому, что электроны и ионы распространяются вверх и вниз от области максимального ионообразования. В результате максимум концентрации электронов и ионов в области F наблюдается выше — на высотах 250–400 км ($N_e \approx 10^6 \text{ см}^{-3}$) [76], электронная температура равна 2000 К, а ионная близка к температуре нейтральной атмосферы и составляет 1400 К. В дневное время мощная ионизация солнечным ультрафиолетовым излучением на этих высотах часто вызывает появление дополнительной "ступеньки" в распределении электронной концентрации с высотой. Ее называют областью F₁ (130–200 км), а вышележащую часть области F — F₂. На больших высотах возрастает роль процессов диффузии, что приводит к преобладанию более легких ионов. Диффузионный обмен ионами между верхней частью ионосферы и вышележащей плазмосферой оказывается исключительно важным стабилизатором характеристик слоя F.

Параметры ионосферы, такие как электронная концентрация, ионный состав, электронная и ионная температуры, потоки частиц и дрейфы, находятся в зависимости не только от высоты и времени суток, но и от географических и геомагнитных координат, а также от изменений интенсивности солнечного коротковолнового излучения в течение солнечного цикла. Обилие параметров, характеризующих ионосферу, и разнообразие зависимостей каждого параметра от различных факторов очень усложняют задачу построения моделей ионосферы.

Модели ионосферы можно разделить на эмпирические (статистические), теоретические и гибридные [7, с. 15].

Эмпирические модели основаны на обобщении ряда наблюдений отдельных ионосферных параметров и представлены в виде графиков, таблиц или формул. Примером такой модели может служить Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere) [30], построенная на основе экспериментальных данных. Она позволяет рассчитать профили электронной концентрации, относительную концентрацию различных положительных ионов, профили температур, частоты соударений и дает сведения об отрицательных ионах в слое D. Модель предназначена для нескольких широтных зон, трех сезонов (зима, лето, равноденствие) и трех уровней солнечной активности.

Основная трудность в случае создания эмпирических моделей ионосферы состоит в необходимости учета большого числа параметров, при этом оказывается, что имеющихся в наличии данных наблюдений недостаточно для построения модели. Поэтому для практических целей создание теоретической модели ионосферы наиболее перспективно, нежели прямые попытки создания достаточно полных эмпирических моделей. Однако при построении теоретических моделей возникают трудности, связанные с выбором внутренне согласованной системы аэрономических параметров, а для возмущенных условий важны также данные об электрических полях и корпускулярных потоках.

Гибридные модели сочетают в себе элементы как эмпирических, так и теоретических моделей. Теоретическая часть такой модели представляет собой систему дифференциальных уравнений, учитывающих влияние основных процессов в данной области ионосферы. Рассчитанное распределение электронной концентрации затем корректируется по значениям высоты и электронной концентрации в максимуме слоя F_2 , полученными в результате статистической обработки данных ионосферного зондирования. При таком подходе до некоторой степени снимаются трудности, связанные с неопределенностью в задании системы аэрономических параметров, особенно нейтрального состава, термосферных ветров и электрических полей, которые сильно влияют на электронную концентрацию. Следует отметить, что в практическом отношении, например, для задач расчета трасс распространения радиоволн, гибридные модели ионосферы являются, по-видимому, наиболее удобными.

3.2. Влияние ионосферы на распространение радиосигнала

Рассмотрим электромагнитную волну, распространяющуюся в пространстве, с длиной λ и частотой f . Скорость

$$V_p = \lambda \cdot f$$

называется фазовой скоростью. Фазовая V_p и групповая V_g скорости связаны между собой соотношением [50, с. 99]

$$V_g = V_p - \lambda \cdot \frac{dV_p}{d\lambda}. \quad (3.1)$$

Скорость V распространения плоской электромагнитной волны в среде зависит от коэффициента рефракции среды n . В общем случае

$$V = \frac{c}{n},$$

где c — скорость света в вакууме,
 n — коэффициент рефракции.

Отсюда следует

$$V_p = \frac{c}{n_p},$$

$$V_g = \frac{c}{n_g}.$$

Из соотношения (3.1) можно получить уравнение, связывающее n_p и n_g :

$$n_g = n_p + f \cdot \frac{dn_p}{df}. \quad (3.2)$$

Для распространяющихся дециметровых и более коротких радиоволн ионосфера является изотропной неоднородной прозрачной средой, коэффициент рефракции n_p которой с учетом магнитного поля Земли определяется формулой вида [22]:

$$n_{p\pm}^2 = 1 - \frac{2\xi(1-\xi)}{2(1-\xi)^2 - \eta^2 \sin^2 \theta_B \pm \sqrt{\eta^4 \sin^4 \theta_B + 4\eta^2 \cos^2 \theta_B (1-\xi)^2}}, \quad (3.3)$$

где $\xi = \left(\frac{f_p}{f}\right)^2,$

$$\eta = \frac{f_g}{f},$$

$$f_p = \frac{e}{2\pi} \sqrt{\frac{N_e}{\varepsilon_0 m_e}} \text{ — плазменная частота среды [12, с. 343],}$$

$$f_g = \frac{|e| \cdot B_0}{2\pi m_e} \text{ — гироманнитная (циклотронная) частота [12, с. 343],}$$

f — частота несущей волны,

N_e — концентрация свободных электронов,

e — заряд электрона,

m_e — масса электрона,

ε_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства,

θ_B — угол между вектором магнитного поля Земли \vec{B}_0 и вектором распространения фронта волны,

$$B_0 = |\vec{B}_0|.$$

Знак "+" в формуле (3.3) соответствует "обыкновенной" волне, знак "-" — "необыкновенной".

При условии

$$\eta \ll 2 \left(1 - \xi \frac{|\cos \theta_B|}{\sin^2 \theta_B} \right) \quad (3.4)$$

(3.3) можно разложить в ряд по отрицательным степеням f . Для земной ионосферы с $N_e = 10^{12}$ электронов/м³ плазменная частота среды равна $f_p \approx 8,9$ МГц, а гироманнитная частота электрона в магнитном поле Земли ($B_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Тл) — $f_g \approx 0,59$ МГц. Для несущих частот системы GPS ($f_1 = 1575,42$ МГц, $f_2 = 1227,60$ МГц) имеем

$$\begin{aligned} \frac{f_p}{f_1} &\approx 5,65 \cdot 10^{-3}, & \frac{f_p}{f_2} &\approx 7,25 \cdot 10^{-3}, \\ \frac{f_g}{f_1} &\approx 3,75 \cdot 10^{-4}, & \frac{f_g}{f_2} &\approx 4,81 \cdot 10^{-4}. \end{aligned}$$

Следовательно, условие (3.4) выполняется для несущих частот f_1 и f_2 для углов, больших $\theta_B \approx 89^\circ$ [22].

Раскладывая (3.3) в ряд по малому параметру и сохраняя члены, обратно пропорциональные f^4 , получим [22]

$$n_{p\pm} = 1 - \frac{1}{2}\xi \pm \frac{1}{2}\xi\eta|\cos\theta_B| - \frac{1}{4}\xi\left(\frac{1}{2}\xi + \eta^2(1 + \cos^2\theta_B)\right).$$

Из (3.2) получим выражение для n_g :

$$n_{g\pm} = 1 + \frac{1}{2}\xi \mp \frac{1}{2}\xi\eta|\cos\theta_B| + \frac{3}{4}\xi\left(\frac{1}{2}\xi + \eta^2(1 + \cos^2\theta_B)\right).$$

То есть для обыкновенной волны

$$\begin{aligned} n_p &= 1 + \frac{C_2^p}{f^2} + \frac{C_3^p}{f^3} + \frac{C_4^p}{f^4}, \\ n_g &= 1 + \frac{C_2^g}{f^2} + \frac{C_3^g}{f^3} + \frac{C_4^g}{f^4}, \end{aligned}$$

причем

$$C_2^p = -C_2^g = -\frac{1}{2}f_p^2 = -\frac{1}{2} \cdot \frac{e^2 N_e}{4\pi^2 \varepsilon_0 m_e}.$$

Так как n_g и n_p отличаются от единицы, то групповая и фазовая скорости распространения электромагнитной волны не равны c . Время распространения сигнала в среде с коэффициентом рефракции, отличным от единицы, выражается формулами [63]:

$$t_g = \int_0^S \frac{1}{V_g} dS = \frac{1}{c} \int_0^S n_g dS = \frac{S}{c} + \frac{e^2}{8\pi^2 c \varepsilon_0 m_e f^2} \int_0^S N_e dS,$$

$$t_p = \int_0^S \frac{1}{V_p} dS = \frac{1}{c} \int_0^S n_p dS = \frac{S}{c} - \frac{e^2}{8\pi^2 c \varepsilon_0 m_e f^2} \int_0^S N_e dS,$$

оставляя лишь члены, обратно пропорциональные f^2 . Отсюда временная задержка сигнала за ионосферу

$$\Delta t_g^{ion} = \frac{e^2}{8\pi^2 c \varepsilon_0 m_e f^2} \int_0^S N_e dS = \frac{C^{ion}}{cf^2} \cdot TEC, \quad (3.5)$$

$$\Delta t_p^{ion} = -\frac{e^2}{8\pi^2 c \varepsilon_0 m_e f^2} \int_0^S N_e dS = -\frac{C^{ion}}{cf^2} \cdot TEC, \quad (3.6)$$

где $C^{ion} = \frac{e^2}{8\pi^2 \varepsilon_0 m_e} \approx 40,3 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-2},$

$TEC = \int_0^S N_e dS$ — общее содержание электронов вдоль линии распространения

сигнала.

Таким образом, ионосферную рефракцию можно записать в виде

$$\Delta \rho^{ion} = \pm \frac{C^{ion}}{f^2} \cdot TEC,$$

где знак "+" используется для кодовых наблюдений, а знак "-" — для фазовых.

3.3. Klio: программа определения параметров ионосферы из GPS–наблюдений

3.3.1. Обзор программы Klio. Программное обеспечение Klio [16] предназначено для оценки параметров ионосферы из данных GPS–наблюдений. Данная программа написана на языке программирования Turbo Pascal 6.0 и содержит более 6500 строк.

Условно программу Klio можно разбить на следующие блоки:

- блок преобразования входных данных во внутренний формат;
- блок проверки качества данных и определения моментов скачков фаз;
- блок определения параметров ионосферы;
- блок вспомогательных программ.

Последний блок включает подпрограммы различных типов: дополнительные математические функции, квадратно–корневой информационный фильтр (SRIF) [28], подпрограммы преобразования эпох и т.д.

Входными данными служат файлы наблюдений GPS–спутников в формате RINEX [46, 47], точные эфемериды GPS–спутников в формате SP3 [69], объединенные ряды параметров вращения Земли (C04–файлы) [17, с. I–37 — с. I–39]. Указанные входные файлы в форматах RINEX и SP3 являются текстовыми файлами, что делает неудобным их быструю обработку. Для записи этих файлов в бинарном формате служит блок преобразования входных данных во внутренний формат.

3.3.2. Блок проверки качества данных и поиска скачков фаз. Во время наблюдений GPS–приемник регистрирует дробную часть фазы биения (т.е. разность между переданной GPS–спутником несущей волной и сигналом–копией, генерируемым приемником). Счетчик целых циклов увеличивается на единицу каждый раз, когда фаза изменяется с 2π до 0. Значит, в заданную эпоху наблюдаемая фаза является суммой показателя счетчика целых чисел и дробной части фазы.

Начальное целое количество циклов, соответствующее начальному расстоянию между GPS–спутником и GPS–приемником, является неизвестным. Эта фазовая неоднозначность остается постоянной до того момента, пока не будет перерыва в наблюдениях данного спутника. Перерыв в наблюдениях приводит к скачку фазы на целое количество циклов.

Причины, приводящие к скачку фазы, можно разбить на три типа:

- 1) наличие преград на пути распространения сигнала (деревья, строения, горы и т.д.);
- 2) малое отношение уровня сигнала к шуму, вызванное неблагоприятными ионосферными условиями, дополнительными отражениями сигнала, малым углом места GPS–спутника и т.д.;
- 3) сбой программного обеспечения GPS–приемника, приводящий к неправильной обработке сигнала.

Скачок фазы крайне редко может быть вызван и сбоями осциллятора на GPS–спутнике.

Каждый скачок фазы приводит к увеличению числа неизвестных параметров при обработке GPS–наблюдений. Поэтому для корректной обработки данных необходимо знание моментов всех скачков фазы. Для определения этих моментов, а также для маркировки выбросов, и служит данный блок.

Для проверки качества данных и определения моментов скачков фазы в качестве наблюдаемых величин используются линейные комбинации L_3 и L_4 . Использование L_4 предпочтительнее, так как параметры ионосферы оцениваются при обработке именно этой комбинации, но в случае экстремальных ионосферных условий лучше использовать L_3 .

В данном блоке проверяется, можно ли фазовые наблюдения представить полиномом степени Q ($Q \leq 2$) на определенном отрезке времени, содержащем $Q + 2$ эпохи наблюдений.

На первом шаге проводится процесс инициализации. Берутся первые $Q + 2$ наблюдения. Если $(Q + 1)$ -ая производная интерполяционного полинома,

аппроксимирующего эти наблюдения, равна нулю в пределах 3σ , где σ — точность аппроксимации, определяемая из точности единичного наблюдения σ_0 , то процесс инициализации завершен успешно, и первому наблюдению из проверяемого ряда присваивается флаг "скачок фазы". Иначе первое наблюдение рассматривается как выброс и маркируется. Тестируемый интервал сдвигается на одну эпоху, и процесс инициализации повторяется до успешного завершения. После этого тестируемый интервал опять сдвигается на одну эпоху наблюдения, и $Q + 1$ -ая производная интерполяционного полинома, аппроксимирующего этот новый ряд наблюдений, опять проверяется на равенство нулю в пределах 3σ . Если это условие выполняется, то $Q + 2$ -ое наблюдение из этого ряда принимается, и тестируемый интервал снова сдвигается на одну эпоху. Данный процесс повторяется до тех пор, пока рассматриваемая производная превысит предел 3σ . В этом случае последнее наблюдение из тестируемого ряда маркируется, а его место занимает наблюдение в следующую эпоху. Замаркированное наблюдение трактуется как выброс. В случае, когда временной интервал между эпохами, соответствующими $Q + 1$ -ому и $Q + 2$ -ому наблюдениям в рассматриваемом ряду, превысит задаваемый интервал ΔT , выбирается новый ряд наблюдений, в котором первым становится $Q + 2$ -ое наблюдение из предыдущего ряда. Происходит процесс реинициализации, после успешного завершения которого осуществляется обратный ход для снятия маркировки с наблюдений, ошибочно принятых за выбросы. Самому раннему восстановленному наблюдению присваивается флаг "скачок фазы".

Входными параметрами являются

- тип линейной комбинации (L_3 или L_4);
- степень полинома Q ($Q \leq 2$);
- интервал времени ΔT ;
- ошибка единичного наблюдения σ_0 .

Минимальное значение интервала ΔT определяется из соотношения

$$\Delta T = \left(\sigma_0 + 2 \right) T_{obs}$$

где T_{obs} — интервал наблюдений. Максимальное значение ΔT равно 10 минутам. Значение ошибки единичного наблюдения σ_0 может быть взято из интервала 0,01–0,10 м [24].

3.3.3. Блок оценки параметров ионосферы. В данном блоке параметры ионосферы оцениваются в рамках модели тонкого слоя. Эта модель основывается на предположении, что все свободные электроны находятся на сферическом бесконечно тонком слое на некоторой высоте h_{ion} над земной поверхностью (рис. 3.2). Данная модель не является очень точной моделью ионосферы. Во-первых, рассматривается зависимость параметров ионосферы только от одного фактора — положения Солнца (местного солнечного времени). Во-вторых, модель тонкого слоя может быть названа моделью "замороженной" ионосферы, то есть ионосфера представляется как сферический

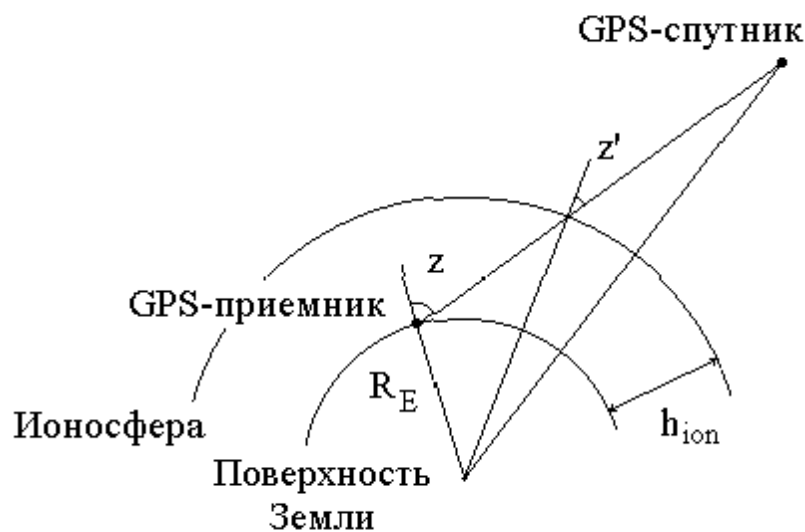


Рис. 3.2. Графическое представление модели тонкого слоя

слой с выпуклостью, движущийся над поверхностью Земли синхронно с движением Солнца по небесной сфере. В–третьих, изменения со временем внутри ионосферы в модели тонкого слоя не рассматриваются.

Запишем уравнения фазовых наблюдений (1.9) на частотах L_1 и L_2 в виде:

$$\rho_R^S + \Delta \rho_1^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + \lambda_1 N_1 - \Phi_1 = v_{R1}^S, \quad (3.7)$$

$$\rho_R^S + \Delta \rho_2^{ion} + \Delta \rho^{tropo} - \Delta \rho^{rel} + c \cdot \Delta t^S - c \cdot \Delta t_R + \lambda_2 N_2 - \Phi_2 = v_{R2}^S. \quad (3.8)$$

Формируем фазовую комбинацию L_4 :

$$\Phi_4 = \Phi_1 - \Phi_2. \quad (3.9)$$

Подставляем (3.7), (3.8) в (3.9):

$$(\Delta \rho_1^{ion} - \Delta \rho_2^{ion}) + (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) - \Phi_4 = v_{R4}^S, \quad (3.10)$$

где $v_{R4}^S = v_{R1}^S - v_{R2}^S$.

Как было указано в п. 3.2, ионосферная рефракция на частоте f_j представима в виде:

$$\Delta \rho_j^{ion} = \pm \frac{C^{ion}}{f_j^2} \cdot TECS, \quad (3.11)$$

Знак "+" используется для кодовых наблюдений, а знак "-" — для фазовых. В данном уравнении учитываются только члены, обратно пропорциональные f_j^2 .

Уравнение (3.11) может быть записано в виде:

$$\Delta \rho_j^{ion} = \pm \frac{C^{ion}}{f_j^2} \cdot TVEC \cdot M \text{ €}, \quad (3.12)$$

где $TVEC$ — общее содержание электронов в зените;

$M(z)$ — коэффициент наклона;

z — зенитное расстояние GPS-спутника.

Простейший вид коэффициента наклона:

$$M(z) = \frac{1}{\cos z'},$$

где $\sin z' = \frac{R_E}{R_E + h_{ion}} \cdot \sin z$ (см. рис. 3.2);

R_E — средний радиус Земли.

Так как значения фазовых неоднозначностей N_1 и N_2 в данном контексте нас не интересуют, то введем обозначение:

$$N_4 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2, \quad (3.13)$$

Подставим (3.12) в (3.10) с учетом (3.13):

$$-\frac{C^{ion}}{\cos z'} \cdot TVEC \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_{R4}^S. \quad (3.14)$$

$TVEC$ моделируется в виде разложения Тейлора по географической широте b и часовому углу Солнца s :

$$TVEC(b, s) = \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik} \cdot (b - b_0)^i \cdot (s - s_0)^k, \quad (3.15)$$

где $E_{ik} = \frac{1}{i!k!} \frac{\partial^{i+k} TVEC}{\partial^i b \partial^k s} \Big|_{b_0, s_0},$

$$i = 0 \dots i_{\max}, \quad k = 0 \dots k_{\max},$$

(b_0, s_0) — точка разложения.

Часовой угол Солнца — угол между Солнцем и местным меридианом (положительный на запад). Местное солнечное время t_{Sun} связано с часовым углом Солнца соотношением:

$$t_{Sun} = s + 12^h.$$

В данном алгоритме s_0 — часовой угол Солнца, соответствующий середине интервала наблюдений, b_0 — среднее значение широт всех GPS-пунктов, используемых для вычисления модели.

Подставим (3.15) в (3.14):

$$-\frac{C^{ion}}{\cos z'} \cdot \sum_{i=0}^{i_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} E_{ik} \cdot (b - b_0)^k \cdot (s - s_0)^i \cdot \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right) + N_4 - \Phi_4 = v_{R4}^S.$$

Получим уравнение, линейное по отношению к неизвестным параметрам E_{ik} и константе N_4 . Эти неизвестные величины оцениваются рекурсивно с помощью квадратно-корневого информационного фильтра (SRIF) [28].

Выбор оптимальных максимальных степеней разложения Тейлора i_{\max} и k_{\max} зависит от поведения ионосферы во времени и пространстве. Однако слишком большие значения степеней уменьшают реальность оцениваемых параметров. Наилучшие значения степеней разложения [79, с. 47]:

1 – 2 для широты b и

2 – 4 для часового угла Солнца s ,

если модель строится на четырехчасовом интервале наблюдений на территории, не превышающей по размерам континента. Максимальная степень разложения по часовому углу Солнца больше максимальной степени разложения по широте, так как территория, покрываемая моделью тонкого слоя по долготе, гораздо больше, чем территория, покрываемая по широте.

Входными параметрами для данного блока являются

- высота тонкого слоя h_{ion} (300–400 км);
- количество GPS–пунктов, используемых для вычисления модели;
- степени разложения по часовому углу Солнца, по широте и для смешанных членов;
- минимальный угол места наблюдаемых GPS–спутников $(\pi/2 - z)$;
- тип коэффициента наклона $M(z)$;
- нормирующие множители для часового угла Солнца, широты и общего содержания электронов.

Результаты оценки параметров ионосферы по модели тонкого слоя не очень чувствительны к выбору высоты h_{ion} . Например, использование моделей тонкого слоя с высотами h_{ion} , отличающимися на 100 км, при определении координат пунктов наблюдений приводит к относительному изменению длин полученных баз приблизительно на $0,04 \cdot 10^{-6}$ [44].

3.3.4. Тестовые результаты. Для проверки работоспособности программного обеспечения Klio были обработаны наблюдения GPS–спутников, проходившие в рамках GPS–кампании GEODUC'95. Те же наблюдения были обработаны комплексом Vernese v.3.5 [24] с теми же входными параметрами. Это позволило сравнить полученные результаты и оценить качество работы программы Klio.

В табл. 3.1 приведены пункты и сессии наблюдений, использовавшиеся при данной обработке. Среди выбранных пунктов есть пункты как с хорошими условиями наблюдений (LVIV, SEMN, UZHD), так и с ограниченной видимостью спутников (MORN).

При проверке качества фазовых наблюдений использовались следующие входные параметры:

- тип линейной комбинации: L_4 ;
- степень полинома $Q=1$;

Таблица 3.1.

Сессии GPS–кампании GEODUC'95, которые использовались для тестирования работоспособности программы Klio (UTC)

Пункт	Сессия 2621	Сессия 2631	Сессия 2641	Сессия 2651
BERG			21.09 7:54:15	22.09 16:52:45
			22.09 4:38:15	23.09 6:55:15
LVIV	19.09 7:00:15	20.09 7:00:15	21.09 7:00:15	22.09 7:00:15
	20.09 3:31:00	21.09 3:48:00	22.09 3:46:30	23.09 3:47:45
MORN	19.09 7:00:15	20.09 18:15:30	21.09 7:00:15	22.09 7:00:15
	20.09 2:30:15	21.09 6:00:00	22.09 3:10:30	23.09 3:05:15
SEMN	19.09 7:00:15	20.09 6:51:15	21.09 7:00:15	22.09 6:56:45
	20.09 2:00:15	21.09 1:55:00	22.09 2:00:00	23.09 2:02:15
UZHD	19.09 6:59:30	20.09 7:00:15		
	20.09 2:04:30	21.09 2:03:00		

- интервал времени $\Delta T=120$ с;
- ошибка единичного наблюдения $\sigma_0=0,010$ м.

Результаты проверки, выполненные программой Klio, приведены в табл. 3.2, а в табл. 3.3 показан более подробный отчет для пункта LVIV, сессия 2621. Точно такие же результаты были получены при использовании комплекса Bernese v.3.5.

Модели тонкого слоя строились в основном на четырехчасовых интервалах времени наблюдений с использованием данных с одного (LVIV), двух (LVIV, SEMN), трех (LVIV, SEMN, MORN или LVIV, SEMN, UZHD) и четырех (LVIV, SEMN, MORN, UZHD) GPS–пунктов. Используемые входные параметры:

- высота тонкого слоя $h_{ion}=350$ км;

Таблица 3.2

Результаты проверки качества фазовых наблюдений программой Кlio

Пункт	Сессия	Количество скачков фаз	Количество выбросов
BERG	2641	115	21
	2651	93	24
LVIV	2621	59	12
	2631	58	16
	2641	63	15
	2651	70	17
MORN	2621	130	37
	2631	81	13
	2641	116	15
	2651	132	20
SEMN	2621	43	2
	2631	46	1
	2641	49	0
	2651	49	3
UZHD	2621	116	13
	2631	97	12

– степени разложения

по часовому углу Солнца: 2,

по широте: 1,

для смешанных членов: 2;

– минимальный угол места GPS–спутников: +15°;

– тип коэффициента наклона $M(z) = \frac{1}{\cos z'}$;

Таблица 3.3

Подробные результаты проверки качества фазовых наблюдений
программой Кlio для пункта LVIV, сессия 2621

GPS– спутник	Скачки фазы, номера эпох	Выбросы, номера эпох	Кол–во скачков фазы	Кол–во выбросов
PRN 1	274, 290, 3881, 4533, 4559	—	5	0
PRN 2	2576, 3774, 3792	—	3	0
PRN 4	1482, 3847	4639, 4640	2	2
PRN 5	3520, 3542	3536	2	1
PRN 6	4219	—	1	0
PRN 7	1000, 1653, 3132	1696, 1697, 1710	3	3
PRN 9	3243	—	1	0
PRN 12	2762	—	1	0
PRN 14	744, 759	—	2	0
PRN 15	386, 1713	—	2	0
PRN 16	2222, 3321, 4856	—	3	0
PRN 17	1, 4804, 4826	—	3	0
PRN 18	1371	—	1	0
PRN 19	1866	—	1	0
PRN 20	3950	—	1	0
PRN 21	1	—	1	0
PRN 22	1, 1892, 2039, 2295, 2312	—	5	0
PRN 23	1, 3244, 3664	659, 660, 3657	3	3
PRN 24	1801, 4008, 4032	—	3	0
PRN 25	977, 4422	—	2	0
PRN 26	1, 32, 65, 93, 2754, 3949	76	6	1
PRN 27	2055	—	1	0
PRN 28	1	—	1	0

GPS– спутник	Скачки фазы, номера эпох	Выбросы, номера эпох	Кол–во скачков фазы	Кол–во выбросов
PRN 29	1146	—	1	0
PRN 31	1, 1120, 2825, 2885, 2919	3062, 3063	5	2
Всего			59	12

– нормирующие множители

для часового угла Солнца: 2 часа,

для широты: 6° ,

для общего содержания электронов: 10 TECU

(1 TECU = 10^{16} электронов/м²).

Некоторые полученные модели приведены в табл. 3.4–3.7 и на рис. 3.3–3.6. Значения коэффициентов разложения в ряд Тейлора, полученные обеими программами, довольно близки, и различия между моделями, построенными с использованием этих коэффициентов, невелики (рис. 3.7–3.8). На рис. 3.9 показано изменение общего содержания электронов над пунктом LVIV во время проведения кампании GEODUC'95, полученное по моделям, рассчитанным программой Клио. Как видно из рис. 3.10, разности между TVEC для этого пункта, полученными обеими программами, не превышает значение 0,25 TECU. Следует заметить, что средняя точность определения TEC при использовании модели тонкого слоя составляет 3–4 TECU для GPS–пунктов в средних широтах [79, с. 146].

Таблица 3.4

Модель ионосферы LVIV2626

	i	k	Klio	Bernese
Станция			LVIV	
Центр разложения			49,9177° с.ш., 23,9542° в.д. Время (GPS): 9.09.1999 13:00	
Количество эпох			960	960
Количество наблюдений			5402	5310
Среднее квадратичное отклонение, м			0,057	0,057
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0,8602	0,8706
	0	1	-0,0382	-0,0375
	0	2	0,0686	0,0686
	1	0	-0,1923	-0,1953
	1	1	-0,0128	-0,0101
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0,0029	0,0030
	0	1	0,0011	0,0011
	0	2	0,0016	0,0016
	1	0	0,0013	0,0014
	1	1	0,0017	0,0018
Количество использованных скачков фазы			14	13
Количество неиспользованных скачков фазы			2	3

Таблица 3.5

Модель ионосферы LVSE2626

	i	k	Klio	Bernese
Станции			LVIV, SEMN	
Центр разложения			49,2269° с.ш., 23,4910° в.д. Время (GPS): 9.09.1999 13:00	
Количество эпох			1920	1920
Количество наблюдений			10942	10688
Среднее квадратичное отклонение, м			0,062	0,061
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0,8757	0,8874
	0	1	-0,0525	-0,0504
	0	2	0,0476	0,0482
	1	0	-0,1893	-0,1965
	1	1	0,0033	0,0039
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0,0022	0,0023
	0	1	0,0008	0,0008
	0	2	0,0013	0,0013
	1	0	0,0010	0,0010
	1	1	0,0013	0,0014
Количество использованных скачков фазы			28	27
Количество неиспользованных скачков фазы			3	4

Таблица 3.6

Модель ионосферы LMS_2626

	i	k	Klio	Bernese
Станции			LVIV, MORN, SEMN	
Центр разложения			49,1965° с.ш., 23,6256° в.д. Время (GPS): 9.09.1999 13:00	
Количество эпох			2880	2880
Количество наблюдений			16284	15927
Среднее квадратичное отклонение, м			0,060	0,058
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0,8797	0,8904
	0	1	-0,0408	-0,0389
	0	2	0,0537	0,0548
	1	0	-0,1936	-0,2009
	1	1	0,0007	0,0010
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0,0018	0,0019
	0	1	0,0007	0,0007
	0	2	0,0010	0,0010
	1	0	0,0008	0,0009
	1	1	0,0011	0,0012
Количество использованных скачков фазы			56	53
Количество неиспользованных скачков фазы			9	12

Таблица 3.7

Модель ионосферы LMSU2626

	i	k	Klio	Bernese
Станции			LVIV, MORN, SEMN, UZHD	
Центр разложения			49,0381° с.ш., 23,3324° в.д. Время (GPS): 9.09.1999 13:00	
Количество эпох			3840	3840
Количество наблюдений			21807	21301
Среднее квадратичное отклонение, м			0,060	0,059
Значения коэффициентов E_{ik}	0	0	0,8767	0,8871
	0	1	-0,0425	-0,0404
	0	2	0,0543	0,0556
	1	0	-0,1944	-0,2025
	1	1	0,0052	0,0052
Среднее квадратичное отклонение коэффициентов E_{ik}	0	0	0,0016	0,0016
	0	1	0,0006	0,0006
	0	2	0,0009	0,0009
	1	0	0,0007	0,0007
	1	1	0,0010	0,0010
Количество использованных скачков фазы			72	67
Количество неиспользованных скачков фазы			17	22

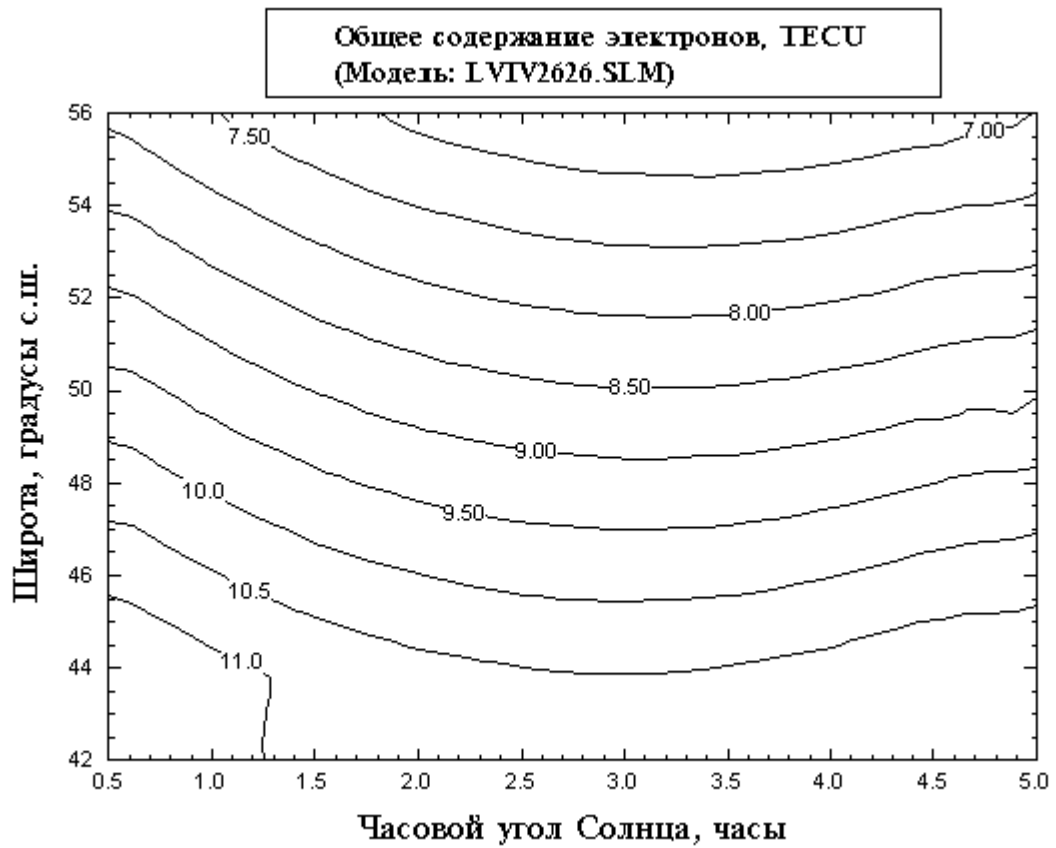


Рис. 3.3. Модель ионосферы LVIV2626, полученная с помощью программы Кlio

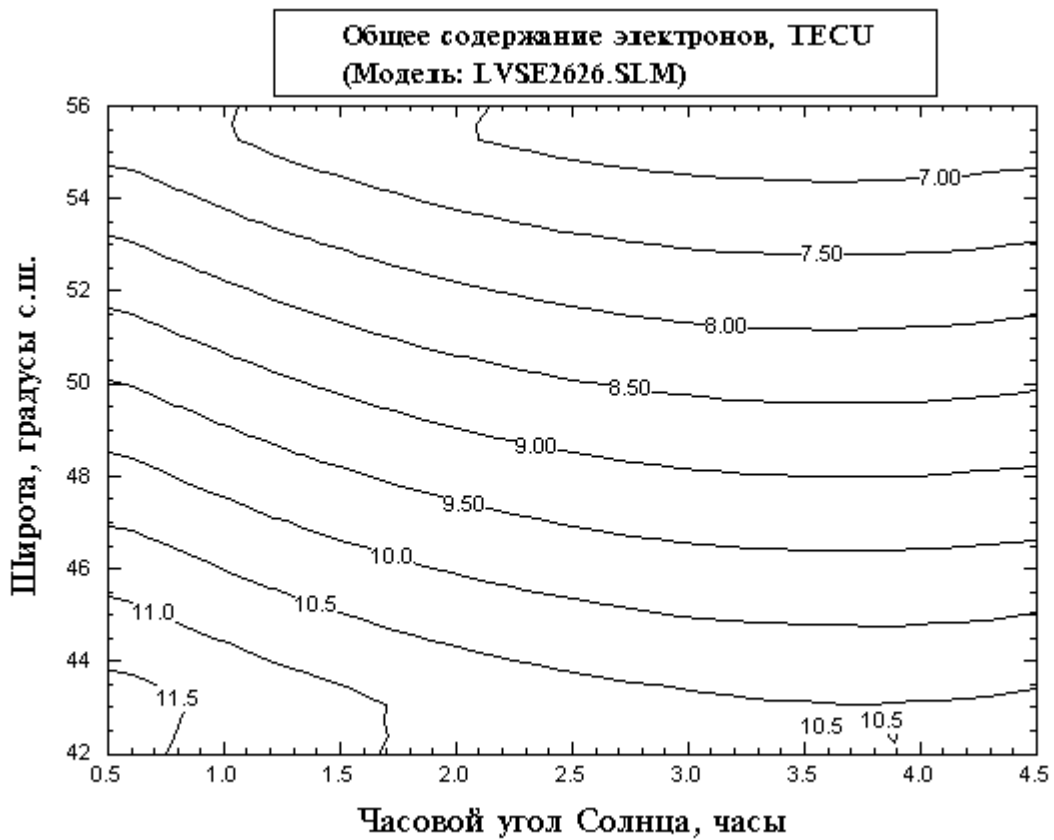


Рис. 3.4. Модель ионосферы LVSE2626, полученная с помощью программы Кlio

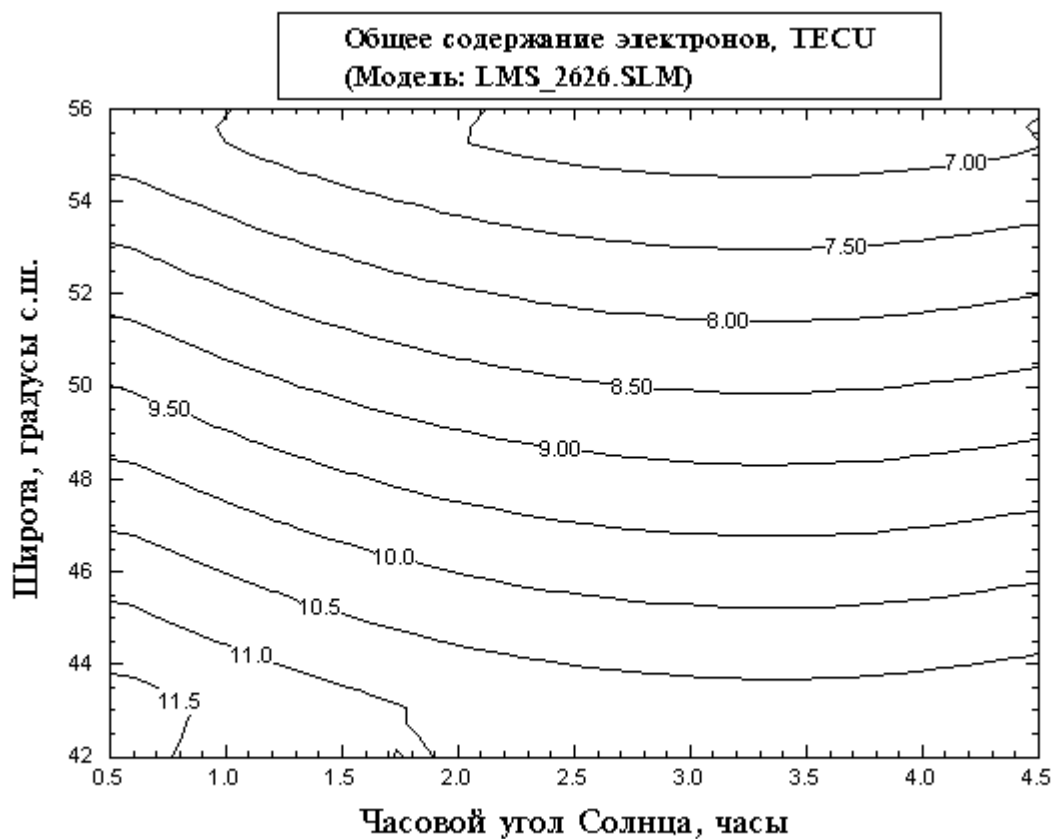


Рис. 3.5. Модель ионосферы LMS_2626, полученная с помощью программы Клю

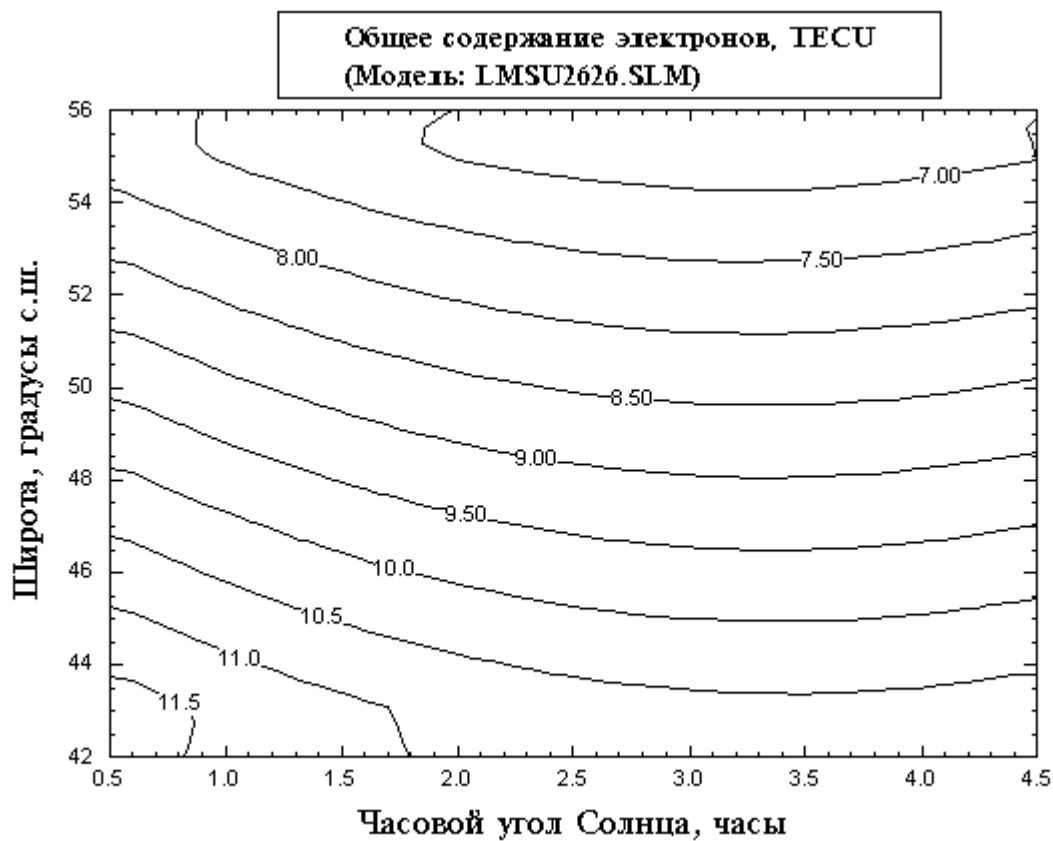


Рис. 3.6. Модель ионосферы LMSU2626, полученная с помощью программы Клю

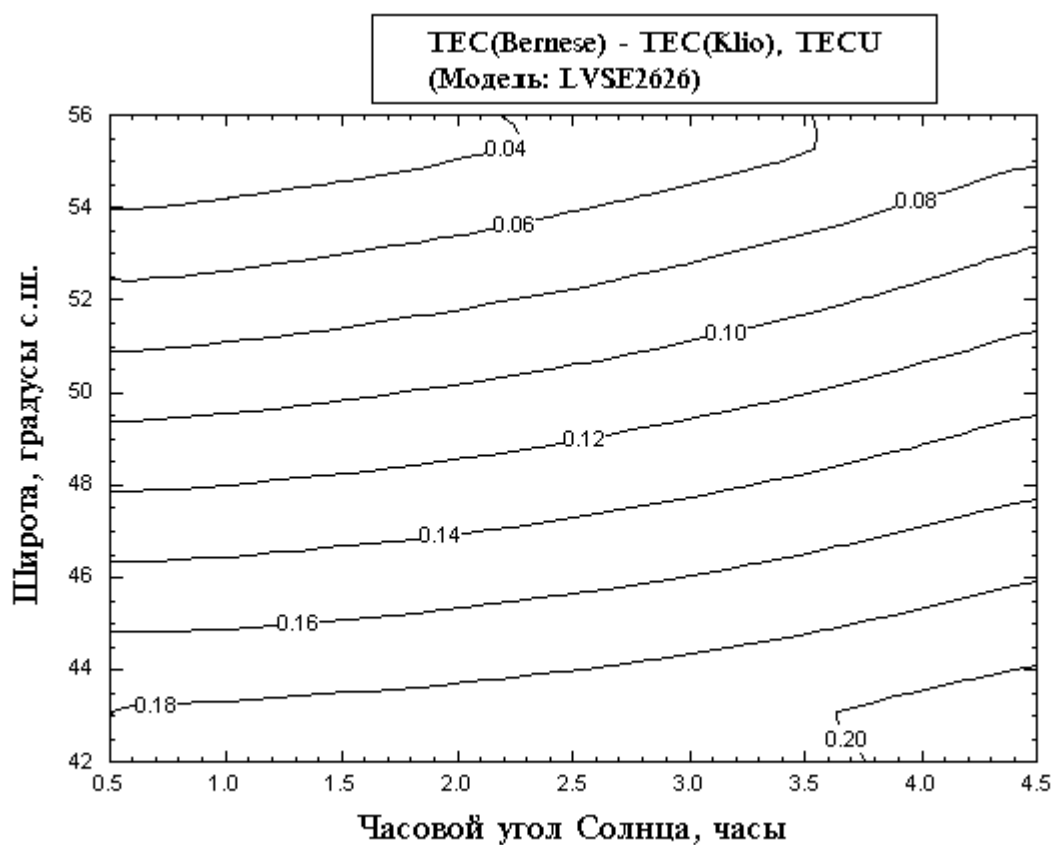


Рис. 3.7. Разности TEC для модели ионосферы LVSE2626

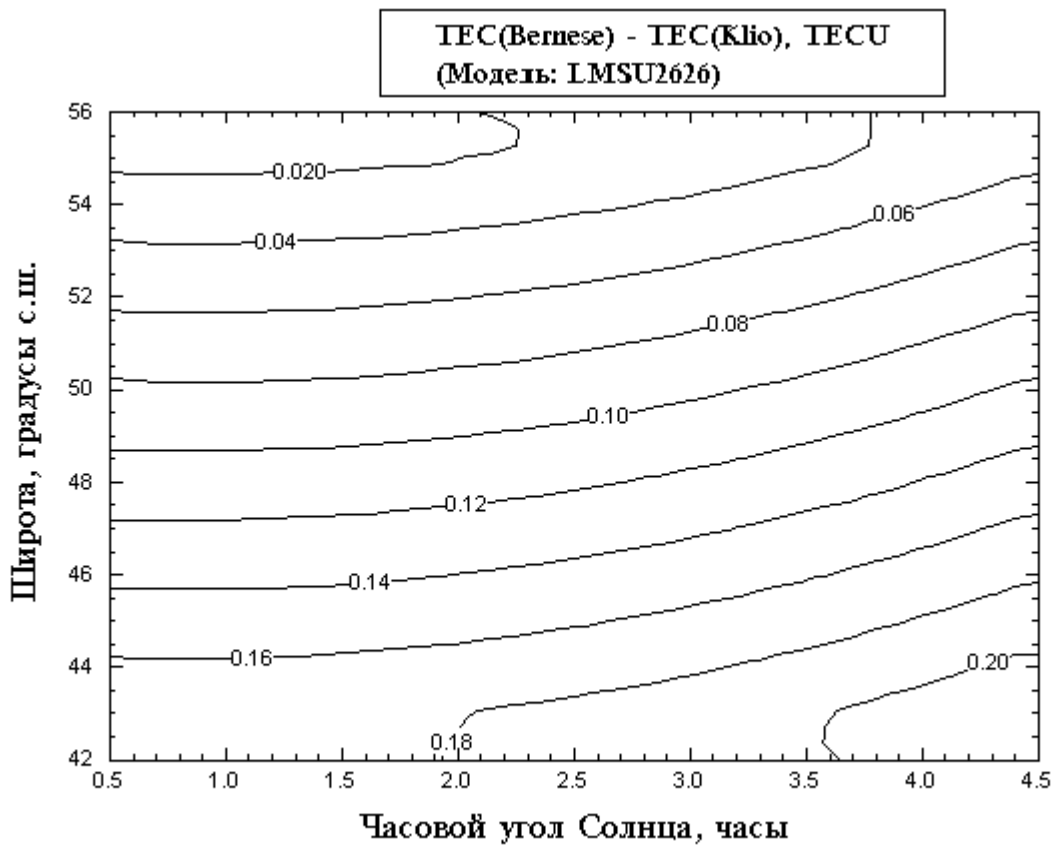


Рис. 3.8. Разности TEC для модели ионосферы LMSU2626

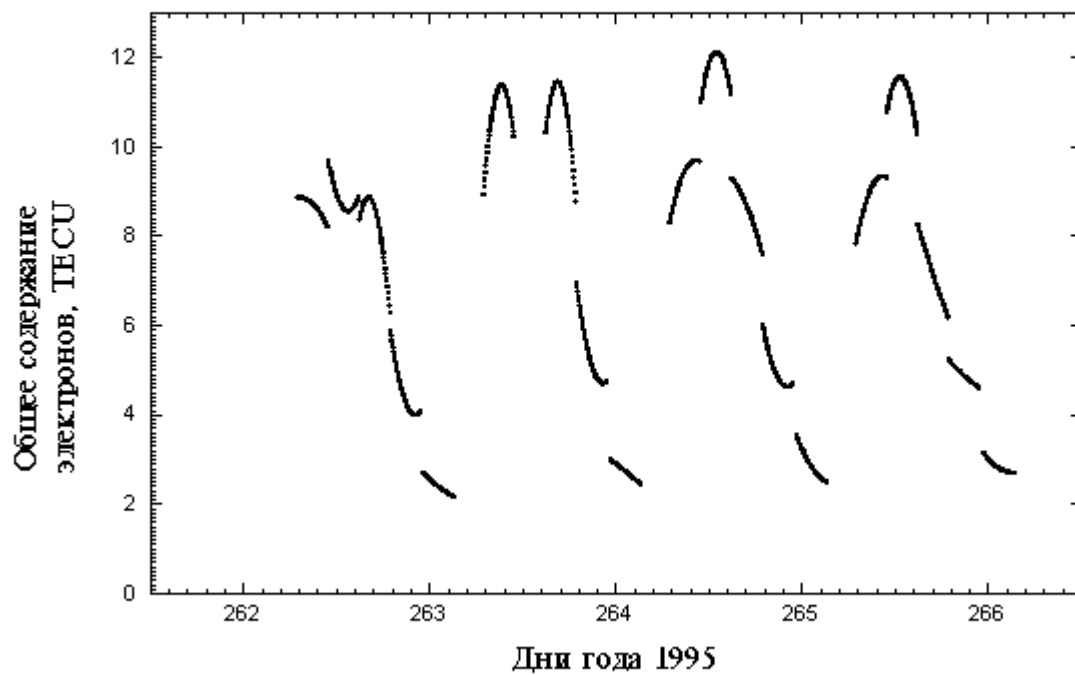


Рис. 3.9. TVEC над пунктом LVIV, полученное с помощью программы Клю

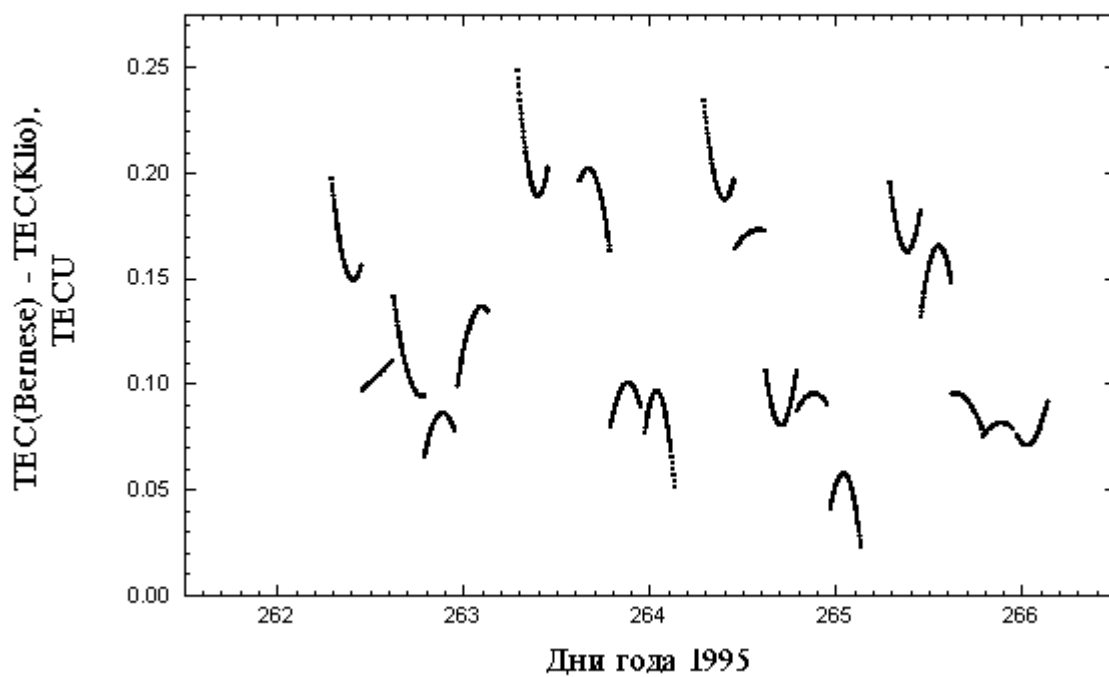


Рис. 3.10. Разности TVEC над пунктом LVIV

3.4. Выводы

Влияние ионосферы является одним из основных источников ошибок при проведении наблюдений GPS–спутников. В период повышенной солнечной активности ионосферная рефракция может достигать порядка 50 м. На практике используются линейные комбинации фазовых наблюдений, которые в некотором приближении исключают влияние ионосферы. При этом используется тот факт, что GPS–спутники передают сигналы на двух частотах L_1 и L_2 . Кроме этого, возможно использование различных моделей ионосферной рефракции.

Имея наблюдения GPS–спутников, можно решить обратную задачу, то есть, зная координаты некоторых станций, можно построить модель ионосферы над территорией, покрываемой этими станциями.

В данной главе описаны алгоритмы оценки параметров ионосферы из обработки наблюдений GPS–спутников в рамках модели тонкого слоя. Эти алгоритмы реализованы в программном обеспечении Klio. Вычисленные с его помощью значения TEC для нескольких пунктов кампании GEODUC'95 с различными условиями видимости GPS–спутников согласуются с полученными с помощью комплекса Bernese v.3.5 в пределах 0,25 TECU. При этом средняя точность определения TEC для GPS–пунктов в средних широтах при использовании модели тонкого слоя составляет 3–4 TECU.

Из полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- программное обеспечение Klio может быть использовано для оценки параметров ионосферы из данных GPS–наблюдений;
- оценка параметров ионосферы, полученная программой Klio, находится в хорошем согласии с результатами, полученными с помощью комплекса Bernese v.3.5.

ВЫВОДЫ

В диссертации приведены результаты использования наблюдений GPS-спутников для геодинамических и ионосферных исследований в Украине.

С целью привязки координатной системы Украины к Международной земной системе отсчета на территории страны установлены три перманентные GPS-станции: GLSV (Голосеево, г. Киев), UZHL (г. Ужгород) и EVPA (г. Евпатория). Станции Голосеево и Ужгород включены в международные сети IGS и EUREF. Режим работы всех трех станций соответствует требованиям этих организаций. Работа станций полностью автоматизирована с помощью разработанных алгоритмов и программ.

С целью изучения локальных деформаций земной коры было проведено ряд кампаний наблюдений GPS-спутников на геодинамических полигонах на территории Украины. Из обработки GPS-наблюдений были получены высокоточные координаты пунктов на этих полигонах.

Были организованы и проведены крымские части международных кампаний GPS-наблюдений РЕКА-93 и РЕКА-94. Одновременно с кампанией РЕКА-94 была спланирована, организована и проведена GPS-кампания на Крымском геодинамическом полигоне (Симеиз-Кацивели). В результате обработки данных наблюдений GPS-спутников во время этой кампании были получены координаты пунктов полигона с внутренней точностью решения 1,0–1,5 мм. Координаты маркера мобильной станции ЛЛС и РТ-22, вычисленные из GPS-решения с учетом эксцентриситетов, полученных из высокоточных геодезических измерений, совпадают с координатами из решений ITRF92 и ITRF93 в пределах ошибок вычислений. Расхождения аналогичных координат для двух станций ЛЛС могут быть объяснены ошибками калибровки этих станций.

Были спланированы, организованы и проведены две кампании наблюдений GPS-спутников GEODUC'93 и GEODUC'95 в рамках международного украинско-польско-венгерского проекта "Геодинамика Украинских Карпат". В результате

обработки данных GPS–кампании GEODUC'95 были получены повторные координаты пунктов данного проекта. Ошибки определения координат составили 3 мм (9 мм), ошибки определения длин баз — 1–3 мм (5–10 мм) для приемников типа "Trimble" ("Ashtech").

Была спланирована, организована и проведена GPS–кампания на локальном полигоне ГАО НАН Украины. Из обработки данных этой кампании были получены координаты будущей (на тот момент) перманентной GPS–станции GLSV, астрономического пункта и других маркеров с точностью 0,1–1,1 мм. Разности координат, полученных из GPS–решения и обработки высокоточных геодезических измерений, для пунктов с хорошей видимостью GPS–спутников лежат в пределах ошибок вычислений.

Разработаны и реализованы алгоритмы и программы оценки в рамках модели тонкого слоя параметров ионосферы из обработки наблюдений GPS–спутников. Вычисленные значения TEC для нескольких пунктов кампании GEODUC'95 с различными условиями видимости GPS–спутников согласуются с полученными с помощью комплекса Vernese v.3.5 в пределах 0,25 TECU. При этом, средняя точность определения TEC для GPS–пунктов в средних широтах при использовании модели тонкого слоя составляет 3–4 TECU.

Разработанные методики и опыт, приобретенный в ходе выполнения диссертационной работы, позволяют внедрить широкое использование GPS–технологии для геодинамических исследований и геодезических работ.

Данная работа была выполнена в ГАО НАН Украины. Автор выражает искреннюю признательность своему руководителю академику НАН Украины Я.С.Яцкиву за постоянное внимание к работе. Автор глубоко благодарен И.Ю.Гайовичу и А.Н.Самойленко за полезное сотрудничество, С.Л.Болотину, В.Н.Салямому, П.П.Берцику, С.П.Руденко и К.Х.Нурутдинову за ценные советы в процессе выполнения работы.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бекер М.Н., Кумкова И.И., Олифинов В.Г. и др. Первые результаты GPS кампаний ВЕГЕНЕР в регионе Северного Кавказа // Труды ИПА РАН, вып. 1, "Астрометрия и геодинамика". — СПб.: Институт прикладной астрономии РАН. — 1997. — С. 155–169.
2. Болотин С.Л. Вторичная обработка РСДБ наблюдений при помощи программного обеспечения SteelBreeze 1.0 // Труды конференции "Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики". — СПб.: Институт прикладной астрономии РАН. — 1996. — С. 171–182.
3. Васильев М.В., Кумкова И.И. Обработка GPS-наблюдений кампаний РЕКА–93 и РЕКА–94 // Труды ИПА РАН, вып. 4, "Астрометрия, геодинамика и небесная механика". — СПб.: Институт прикладной астрономии РАН. — 1999. — С. 36–50.
4. Величко О.М., Сафронов Ю.И., Клейман О.С. та ін. Державна служба єдиного часу і еталонних частот України: структура і основні засади забезпечення країни високоточною частотно-часовою інформацією // Космічна наука і технологія. — 1998. — Т. 4, № 2/3. — С. 8–11.
5. Вербицкий Т.З., Кузнецова В.Г. Карпатский комплексный прогностический полигон — состояние и перспективы развития // Сейсмопрогностические исследования на территории УССР. — К.: Наукова думка, 1988. — С. 14–22.
6. Гальперин Ю.И. Верхняя атмосфера // Физика космоса: Маленькая энциклопедия. — 2-е изд. — М., 1986. — С. 156–163.
7. Иванов–Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы (детерминированный подход) // Ленинград: Гидрометеиздат, 1980. — 192 с.
8. Карпатский геодинимический полигон. — М.: Сов. радио, 1978. — 125 с.
9. Кузнецова В., Максимчук В. Стан і перспективи розвитку геодинимічних досліджень в Карпатах // Геодиниміка. — 1998. — № 1. — С. 111–118.

10. Медведев П.П., Баранов И.С. Глобальные космические навигационные системы (геодезическое использование) // Итоги науки и техники. Серия "Геодезия и аэросъемка". — Том 29. — М.: ВИНТИ, 1992. — 159 с.
11. Самойленко А.Н. Локальная геодезическая сеть на Симеизском геодинамическом полигоне. — К.: 1996. — 36 с. (Препр. / НАН Украины. Главная астрономическая обсерватория; ГАО–96–1Р).
12. Физика верхней атмосферы Земли / Пер. с англ. под ред. Г.С. Иванова–Холодного. — Ленинград: Гидрометеиздат, 1971. — 406 с.
13. Хода О. Українська мережа перманентних GPS–станцій // Матеріали Міжнародного науково-технічного симпозиуму "Геомоніторинг–99". — Моршин. — 1999. — С. 19–22.
14. Хода О. Визначення координат нової перманентної GPS–станції UZHL (Ужгород) // Кинеметика и физика небесных тел. — 1999. — Т. 15, № 5. — С. 476–479.
15. Хода О. Перманентна GPS–станція Голосіїв (GLSV): спостереження у 1998 році // Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 4. — С. 75–78.
16. Хода О. Программное обеспечение "Klio" для определения параметров ионосферы // Космічна наука і технологія. — 1999. — Т. 5, № 5/6. — С. 25–32.
17. 1997 IERS Annual Report / International Earth Rotation Service. — Paris: Observatoire de Paris, 1998.
18. Altiner Y., Becker M., Franke P. et al. GPS–Geodynamic projects of the IfAG in Europe // Proc. 1st Turkish International Symposium on Deformations (Istanbul–94). — Istanbul (Turkey). — 1994. — P. 606–625.
19. Ashkenazi V., Moore T., Roberts. G.W. et al. Real time river level monitoring by GPS // Proc. GNSS 98. — Tome 2. — Toulouse (France). — 1998. — VIII–O–02 page 1 – VIII–O–02 page 6.
20. Baran L.W., Busisc I., Cacon S. et al. Status of subregional GPS geodynamics project GEODUC // Proc. 1st Turkish International Symposium on Deformations (Istanbul–94). — Istanbul (Turkey). — 1994. — P. 943–951.

21. Baran L.W., Zablotzky F., Jaks W. et al. Determination of coordinates of the GEODUC'93 stations in the ETRF'89 system // Presented at the 4th International Geodetic Meeting "Poland — Italy". — Warsaw (Poland). — 1994.
22. Bassiri S., Hajj G.A. Higher-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modeling them // *Manuscripta Geodaetica*. — 1993. — Vol. 18. — P. 280–289.
23. Baueršima I. NAVSTAR/Global Positioning System II, Radiointerferometrische Satellitenbeobachtungen // *Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald*. — 1983. — Vol. 10.
24. Bernese GPS Software Version 3.4. Documentation / Rothacher M., Beutler G., Gurtner W. et al. — Bern: Astronomical Institute, University of Bern, 1993.
25. Beutler G. The 1992 IGS Test Campaign, Epoch'92, and the IGS PILOT Service: an overview // *Proc. 1993 IGS Workshop*. — Bern (Switzerland). — 1993. — P. 3–9.
26. Beutler G. The 4th IGS Oversight Committee Meeting and the Joint IERS and IGS Meeting in Bern, 24–27 March 1993 // *Proc. 1993 IGS Workshop*. — Bern (Switzerland). — 1993. — P. 19–24.
27. Beutler G. Development of the IGS // *IGS 1994 Annual Report*. — 1995. — P. 3–9.
28. Bierman G.J. Factorization Methods for Diskrete Sequential Estimation // Orlando, San Diego, New York, Austin, Boston, London, Sydney, Tokyo, Toronto: Academic Press, 1977. — 241 p.
29. Bilham R. Earthquakes and sea level: space and terrestrial metrology on a changing planet // *Review of Geophysics*. — 1991. — Vol. 29, No. 1. — P. 1–29.
30. Bilitza D. The International Reference Ionosphere — celebrating 20 years of international collaboration under URSI umbrella // *Radio Science Bulletin*. — 1998. — No. 286. — P. 4–10.

31. Bolotin S., Gaiovitch I., Khoda O. et al. GPS observational campaign in the geodynamics test area "Simeiz–Katsiveli": data processing and results // *Додаток до журналу "Космічна наука і технологія"*. — 1995. — Т. 1, № 2. — 16 с.
32. Boucher C., Altamimi Z., Duhem L. ITRF92 and its associated velocity field // *IERS Technical Note 15*. — 1993. — 164 p.
33. Boucher C., Altamimi Z., Duhem L. Results and analysis of the ITRF93 // *IERS Technical Note 18*. — 1994. — 313 p.
34. Boyd S., Kiriazes J., Erdogan T. et al. Mission possible: using GPS to calibrate Space Shuttle landing aids // *GPS World*. — 1997. — Vol. 8, No. 1. — P. 20–32.
35. Cheremshynskiy D., Gaiovitch I., Khoda O. et al. Status report on the WEGENER related activity in Ukraine // *Abstracts, presentations and reports from the Sixth General Assembly of WEGENER*. — St.Petersburg (Russia) — 1994. — P. 19–20.
36. Dixon T.H. An introduction to the Global Positioning System and some geological applications // *Review of Geophysics*. — 1991. — Vol. 29, No. 2. — P. 249–276.
37. Engler E., Sardón E., Jakowski N. et al. Real–time monitoring of the ionosphere // *Proc. 1995 IGS Workshop “The IGS: special topics and new directions”*. — Potsdam (Germany). — 1995. — P. 67–76.
38. Essen L., Froome K.D. The refractive indices and dielectric constants of air and its principal constituents at 24000 Mc/s // *Proceedings of Physical Society*. — 1951. — Vol. 64 (B). — P. 862–875.
39. Estey L. TEQC Summary // *Proc. IGS Network Systems Workshop*. — Annapolis (Maryland, USA).— 1998. — P. 343–345.
40. Fejes I. The Central European Regional Geodynamic Project CERGOP (Progress Report) // *Proc. 3rd International Seminar on “GPS in Central Europe”* — Penc (Hungary). — 1995. — *Reports on Geodesy*. — 1995. — No. 3 (16). — P. 301–308.
41. Gaiovitch I., Khoda O., Osmak A., Samoilenko A. Collocation of different geodetic techniques at the Main Astronomical Observatory in Kiev // *Proc. International Workshop on Geodetic Measurements by the Collocation of Space Techniques on Earth (GEMSTONE)*. — Tokyo (Japan). — 1999. — P. 225–229.

42. Gaiovitch I., Khoda O., Samoilenko A., Yatskiv Ya. GEODUC'95 GPS campaign data processing. Comparisons to zero data epoch ('93) // Proc. 4th International Seminar "GPS in Central Europe" — Penc (Hungary). — 1997. — Reports on Geodesy. — 1997. — No. 4 (27). — P. 351–362.
43. Gaiovitch I., Zdunek R. GEODUC'93 GPS campaign data processing // Artificial Satellites, Planetary Geodesy No. 27. — 1996. — Vol. 31, No. 2. — P. 99–106.
44. Georgiadiou Y. Ionospheric delay modelling for GPS relative positioning // Proc. Second International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System. — Ottawa (Canada) — 1990. — P. 403–410.
45. Guidelines for IGS Stations and Operational Centers, Version 1.2 (reformatted for IGS Report, August 31, 1998) (prepared by IGS Infrastructure Committee and Central Bureau) // IGS 1997 Technical Reports. — 1998. — P. 278–285.
46. Gurtner W. RINEX: The Receiver–Independent Exchange Format // GPS World. — 1994. — Vol.5, No.7. — P. 48–52.
47. Gurtner W., Mader G. Receiver Independent Exchange Format Version 2 // GPS Bulletin. — 1990. — Vol.3, No.3. — P. 1–8.
48. Hatanaka Y. Compact RINEX format and tools (beta–test version) // Proc. IGS 1996 Analysis Center Workshop. — Silver Spring (Maryland, USA). — 1996. — P. 121–129.
49. Hatanaka Y. Status of Compact RINEX // Proc. IGS Network Systems Workshop. — Annapolis (Maryland, USA). — 1998. — P.209–211.
50. Hofmann–Wellenhof B., Lichtenegger H., Collins J. Global Positioning System: theory and practice. Fourth, revised edition. — Wien, New York: Springer-Verlag, 1997. — 391 p.
51. Hopfield H.S. Two–quadratic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // Journal of Geophysical Research. — 1969. — Vol. 74, No. 18. — P. 4487–4499.
52. Janes H.W., Langley R.B., Newby S.P. A comparison of several models for the prediction of tropospheric propagation delay // Proc. Fifth International Geodetic

- Symposium on Satellite Positioning. — Las Cruces (New Mexico, USA). — 1989. — Vol. 2. — P. 777–788.
53. Jong C.D. de. Principles and applications of permanent GPS arrays: Ph.D. Dissertation. — Delft, 1997. — 105 p.
54. Kakkuri J. Activity report of the IAG/SSG 5.147 "Studies of the Baltic Sea" // Final results of the Baltic Sea Level 1993 GPS Campaign. Research works of the SSG 5.147 of the International Association of Geodesy. Reports of the Finnish Geodetic Institute. — 1995. — No. 2. — P. 3–7.
55. Kleusberg A., Langley R.B. The limitations of GPS // GPS World. — 1990. — Vol. 1, No. 2. — P. 50–52.
56. Koh S. GPS hails a cab // GPS World Showcase. — 1996. — Vol. 7, No. 8. — P. 13.
57. Langley R.B. The GPS error budget // GPS World. — 1997. — Vol. 8, No. 3. — P. 51–56.
58. Lichtenegger H. DGPS fundamentals // Reports on Geodesy. — 1998. — No. 11 (41). — P. 7–19.
59. Mader G.L. Physical site specifications: GPS antenna calibrations // Proc. IGS Network Systems Workshop. — Annapolis (Maryland, USA). — 1998. — P. 109–113.
60. Mader G.L., MacKay J.R. Calibration of GPS antennas // Proc. IGS 1996 Analysis Center Workshop. — Silver Spring (Maryland, USA). — 1996. — P. 81–105.
61. Mannucci A.J., Wilson B.D., Dah-Ning Yuan et al. Global monitoring of ionospheric total electron content using the IGS network // Proc. 1995 IGS Workshop "The IGS: special topics and new directions". — Potsdam (Germany). — 1995. — P. 49–56.
62. Meertens C., Alber C., Braun J. et al. Field and anechoic chamber tests of GPS antennas // Proc. IGS 1996 Analysis Center Workshop. — Silver Spring (Maryland, USA). — 1996. — P. 107–118.
63. Millman G.H. Ionospheric electron content effects on Earth–space radio propagation — a review // Proc. International Beacon Satellite Symposium. — 1979. — P. 323–339.

64. Mueller I.I. The International GPS Service for Geodynamics: an introduction // Proc. 1993 IGS Workshop. — Bern (Switzerland). — 1993. — P. 1–2.
65. Neilan R. The organization of the IGS // IGS 1994 Annual Report. — 1995. — P. 11–23.
66. Neilan R.E., Melbourne W.G., Yunck T.P. The future role of the IGS Central Bureau: proposed functions, organization and responsibilities // Proc. 1993 IGS Workshop. — Bern (Switzerland). — 1993. — P. 15–18.
67. Nielson J.T. The untold story of the CALCM: the secret GPS weapon used in the Gulf War // GPS World. — 1995. — Vol. 6, No. 1. — P. 26–32.
68. O'Brien A.J., Balogh M. Mayday! Evaluating GPS-enabled emergency dispatch // GPS World. — 1996. — Vol. 7, No. 10. — P. 34–42.
69. Remondi B.W. Extended the National Geodetic Survey Standard GPS Orbit Formats // NOAA Technical Report NOS 133 NGS46. — 1989. — P. 1–85.
70. Rothacher M. Orbits of satellite systems in space geodesy // Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz. — 1992. — Band 46. — 243 p.
71. Rothacher M., Mervart L. (eds.). Bernese GPS Software Version 4.0. Documentation. — Berne: Astronomical Institute, University of Berne, 1996. — 418 p.
72. Rothacher M., Schaer S., Mervart L., Beutler G. Determination of antenna phase center variations using GPS data // Proc. IGS 1995 Workshop "Special topics and new directions". — Potsdam (Germany) — 1995. — P. 205–220.
73. Saastamoinen I.I. Contribution to the theory of atmospheric refraction // Bulletin Géodésique. — 1973. — Vol. 107. — P. 13–34.
74. Samoilenko A., Rudenko S., Schillak S. Local geodetic tie of the Borowiec-1 SLR station to GPS markers // Artificial Satellites. — 1997. — Vol. 32, No. 3. — P. 175–184.
75. Schaer S., Beutler G., Mervart L. et al. Global and regional ionosphere models using the GPS double difference phase observable // Proc. 1995 IGS Workshop "The IGS: special topics and new directions". — Potsdam (Germany). — 1995. — P. 77–92.
76. Stubbe P., Hagfors T. The Earth ionosphere: a well-less plasma laboratory // Surveys in Geophysics. — 1997. — Vol. 18. — P. 57–127.

77. Switzer T. Getting the drift: how water moves out of the surf zone // *GPS World*. — 1997. — Vol. 8, No. 3. — P. 46–50.
78. Tatevian S., Stirberg L. On the role of Simeis Geodynamical Observatory in the WEGENER project // Abstracts, presentations and reports from the Sixth General Assembly of WEGENER. — St.Petersburg (Russia) — 1994. — P. 41–44.
79. Wild U. Ionosphere and geodetic satellite systems: permanent GPS tracking data for modelling and monitoring // *Geodätisch–geophysikalische Arbeit in der Schweiz*. — 1994. — Band 48. — 155 p.
80. Wilson P., Seeger H., Reinhart E. et al. Experiences with GPS measurements from the Black Sea to the Northern Caucasus in the framework of the objectives of SELF and WEGENER // Abstracts, presentations and reports from the Sixth General Assembly of WEGENER. — St.Petersburg (Russia) — 1994. — P. 300–317.
81. Windholz N., Stangl G. CEGRN'94 — Final results computed by the Processing Center Graz // *Proc. 3rd International Seminar on "GPS in Central Europe"* — Penc (Hungary). — 1995. — *Reports on Geodesy*. — 1995. — No. 3 (16). — P. 331–340.
82. Wooden W.H. Navstar Global Positioning System: 1985 // *Proc. First International Symposium on Precise Positioning with the Global Positioning System*. — Vol. 1. — Rockville (Maryland, USA) .— 1985. — P. 23–32.
83. Yatskiv D. Ya., Medvedskij M.M., Suberlyak V.R., Peretyatko M.M. Kyiv Laser Ranging Station report on the experimental operation 1997–1998. — Kiev: 1998. — 16 p. (Preprint / NAS Ukraine. Main Astronomical Observatory; MAO–98–6E).
84. Yatskiv Ya., Khoda O. Current state and prospects of activity of Ukrainian institutions in the field of the creation of the coordinate–and–time and navigation services to users in Ukraine (National report submitted to the CEI WGST Section C) // *Proc. Workshop on DGPS and GLONASS Techniques and Application on Safety in CEI Area*. — Trieste (Italy). — 1999. — *Reports on Geodesy*. — 1999. — No. 3 (44). — P. 121–127.
85. Zerbini S., Baker T., Bürki B. et al. Sea level fluctuations: geophysical interpretation and environmental impact (SELF) // Abstracts, presentations and reports from the sixth General Assembly of WEGENER. — St.Petersburg (Russia). — 1994. — P. 214–225.

86. Zumberge J.F., Neilan R.E., Beutler G., Gurtner W. The International GPS Service for Geodynamics — benefits to users // IGS Directory. — Pasadena (USA): IGS Central Bureau. — 1997. — P. xix–xxii.