УДК 550.34

МЕТОДИКА ОБРАБОТКА ДАННЫХ GPS НАБЛЮДЕНИЙ

Баландин Д.В. – Уральский государственный университет им. А.М. Горького, Екатеринбург

Аннотация. Описаны подходы к проведению измерений методами космической геодезии, этапы обработки GPS измерений и представлены результаты измерений.

Спутниковые навигационные системы, погрешности, программные комплексы, файлы.

TECHNIQUE DATA PROCESSING GPS OF SUPERVISION

Balandin D.V. – Urals State University, Yekaterinburg

Abstract. The approaches to measurement crustal movement with use space-based geodesy, steps of GPS data processing and present result of observations.

Satellite navigating systems, errors, program complexes, files.

Введение

Сегодня очень широкое распространение получили методы космической геодезии. Современные точности спутниковых навигационных систем позволяют успешно использовать их в изучении современных движений земной коры. Основное преимущество космической геодезии заключается в том, что она позволяет проводить измерения в любых метеорологических условиях и в любое время суток. В статье описывается опыт регистрации и обработки данных GPS по станциям, расположенным на Среднем и Северном Урале.

Описание используемой спутниковой навигационной системы

Для изучения геодинамики нами используется глобальная система позиционирования NAVSTAR (GPS NAVSTAR), кратко называемая GPS. Это спутниковая навигационная система, в состав которой входит созвездие из 31 спутника, расположенных на 6 орбитах. Спутники передают навигационные сигналы на двух частотах, частота L_1=1575,42 МГц и частота L_2=1227,60 МГц. Эти частоты выполняют функцию несущих, на которые, методом фазовой модуляции, накладывается две последовательности (в спутниках последних моделей передаются дополнительные последовательности) кодовых сигналов (P-Code и C/A-Code) и навигационное сообщение. Кодовый сигнал P-Code передается на обеих несущих частотах и обладает повышенной точностью. Кодовый сигнал C/A-Code передается только на частоте L_1 и доступен всем пользователям, именно этот сигнал используется гражданскими пользователями для навигации. Навигационное сообщение генерируется на низкой частоте (50 Гц) и методом фазовой модуляции накладывается на обе несущие частоты L_1 и L_2. Навигационное сообщение содержит данные об эфемеридах спутников, времени GPS, рассинхронизации часов на спутниках и системные сообщения.

На сегодняшний день существуют так же и другие спутниковые навигационные системы: ГЛОНАСС (Россия), GALILEO (ЕС) – однако их использование для нужд геодинамики пока невозможно. Это связано как с некоторыми еще не решенными технологическими проблемами самих систем, так и с отсутствием программного комплекса, адаптированного под работу с данными этих систем.

Существует два основных способа определения координат с помощью спутниковых навигационных систем – кодовый метод и фазовый метод наблюдений.

Кодовый метод основан на определении временного промежутка между моментами испускания сигнала со спутника и получения этого сигнала на приемнике. Данный промежуток времени умножается

на скорость распространения радиоволн, в результате чего получается расстояние от спутника до приемника, и затем вычисляются координаты приемника. Этот метод обладает предельной точностью около 5 м и используется для навигации.

Метод фазовых наблюдений основан на использовании фазы, в которой радиоволна от спутника приходит в точку наблюдения. Для точного определения расстояния от источника до приемника измеряют фазу волны в конечной точке и определяют целую часть волн, которые уложились в расстояние от источника до приемника. Современные геодезические приемники измеряют фазу, в которой пришли несущие радиоволны L_1 и L_2 и изменение фазы со временем. Этот метод обладает большей точностью, чем кодовый метод, однако возникает проблема с определением целого числа длин волн, которые уложились в расстояние между спутником и приемником. Кроме того, электромагнитные волны при прохождении через различные среды (экзосфера, ионосфера, тропосфера) испытывают преломления, что сказывается на общем времени распространения сигнала и, следовательно, на фазе, в которой волна придет в конечную точку. Все эти проблемы (нахождение целого числа волн в расстоянии и др.) решаются использованием дополнительных данных и комбинаций способов наблюдения. Конечная предельная точность, которой удается достичь при этом методе наблюдения, достигает 2–3 мм (Wells, 1999).

Наблюдаемые погрешности определения координат в GPS системах и методы их устранения

Все данные, получаемые от спутниковых навигационных систем, подвержены различным факторам, влияющим на точность измерений. Факторы влияния на радиосигнал имеют различные величины амплитуд, периодичности и природу искажений, определяющие конечную ошибку определения координат.

Ошибки определения эфемерид

Эфемериды используются для определения положения спутников в заданный момент времени. Данные об эфемеридах передаются в составе информационного сообщения. Эти данные содержат вычисленные эфемериды, которые рассчитываются в центре управления навигационной системой и загружаются на каждый спутник до нескольких раз в течение дня. Ошибка возникает из-за разницы вычисленного положения и скорости спутника с реальными параметрами. Эта разница возрастает до загрузки обновленных эфемерид на спутник. Среднеквадратичная ошибка расчетных и реальных эфемерид равнялась примерно 2,5 м в 1996 г. и снизилась до 1 м в последние годы. Исключение этой ошибки из конечного определения координат точки наблюдения достигается за счет использования в обработке точных эфемерид спутников, полученных из центров обработки данных GPS (Баландин и др., 2009; Зубович и др., 2001).

Ошибки хода часов спутников

Несмотря на то, что на спутниках используются высокоточные стандарты частоты, расхождения часов на спутниках возможно. Ошибка хода часов на 10^{-7} с вызывает ошибку в определении конечных координат на 26 м. Для исключения этой ошибки используется метод наблюдения «двойной разности», то есть сигнал одного спутника принимается на нескольких (по меньшей мере двух) приемниках, причем координаты одного из приемников заранее известны (Wells, 1999).

Ошибки хода часов приемника

Приемники, как правило, оснащаются недорогими кварцевыми часами, погрешность которых заметно больше, чем у часов спутника. Поэтому для исключения ошибок хода часов приемника используется метод наблюдениям «двойной разности», при котором на одном приемнике ведется прием сигналов с нескольких спутников – по меньшей мере двух (для исключения именно этого вида ошибки) (там же).

Влияние ионосферы на радиоволны

Радиосигнал, распространяясь от спутника до приемника, проходит верхние ио-

низированные слои атмосферы (ионосферу). Влияние ионосферы на радиосигнал спутника зависит от широты, времени года, времени суток и уровня солнечной активности во время наблюдений. Проходя через ионосферу, радиоволны испытывают дисперсию и задержку фазовой скорости, что вносит существенную ошибку в результаты определения координат. Искажения сигнала от этого эффекта вносят ошибку в конечные координаты до 50 м для спутников в зените и до 150 м для спутников с небольшом углом возвышения над горизонтом (Wells, 1999). Устранение ошибок, вызванных эти эффектом, возможно при использовании обоих частот GPS (L_1, L_2). Линейная комбинация частот L_1 и L_2 позволяет полностью исключить влияние ионосферы (там же).

Влияние тропосферы на радиоволны

Радиоволны, распространяясь через неионизированные слои атмосферы – тропосферу, также испытывают дисперсию и искажения. Влияние тропосферы зависит от температуры, давления и влажности атмосферы. Этот эффект является частотно независимым, поэтому его нельзя исключить использованием нескольких частот или их линейной комбинации. На практике используются различные модели, описывающие распространение радиоволн при разных температурах, давлении и влажности (там же). Однако при углах возвышение спутников менее 10 градусов над горизонтом, получить точную модель распространения радиоволн сложно (из-за искажений различной природы).

Аппаратура и методика измерений

Один из способов уменьшить влияние ошибок определения координат – с помощью спутниковых навигационных систем – это использование относительных измерений (Differential GPS–DGPS, данный метод наблюдения имеет схожую идеологию с астрономическим методом РСДБ). Этот метод наблюдения производится двумя и более одновременно работающими приемниками с последующим вычислением разности наблюдений. Вектор расстояния между двумя фазовыми центрами антенн часто называется базовыми линиями. Базовые линии вычисляются по разности фаз прихода радиосигнала от одного спутника к наземным станциям (Wells, 1999). Поскольку современные геодезические приемники имеют порядка двадцати каналов приема радиосигнала, то базовые линии могут быть вычислены для данных от порядка десяти спутников по двум частотам, кроме того базовые линии могут строиться с несколькими станциями одновременно. Результатом обработки является вычисленный вектор расстояния между станциями с эллипсом доверительного интервала. Ошибка определения расстояния составляет 2–4 мм на расстояниях до 20 км. Для применения данного метода на больших расстояниях, при сохранении точности, необходимо использовать дополнительные данные точных эфемерид спутников и параметров вращения Земли (Herring, King, 2008).

Для вычисления местоположения станции, необходимо чтобы координаты одной из точек наблюдения, между которыми был вычислен вектор базовых линий, были заранее известны. В задачах геодинамики обычно такими станциями являются станции, входящие в сеть IGS (International GNSS Service). Их около 400 по всему миру на январь 2010 г. Координаты этих станций определяются из совместной обработки со станциями, входящими в IGS Core. Координаты станций из сети IGS Core определяются различными независимыми методами, в том числе астрономическими (IGS …). Все станции сети IGS являются перманентными и работают круглогодично.

При создании и работе перманентных станций всегда выполнялись рекомендации Международной геофизической службы, которые основывались на опыте работ GPS-аппаратуры по всему миру. В соответствии с рекомендациями IGS приемник перманентной станции должен соответствовать следующим требованиям (там же):

- прием радиоволн обоих несущих частот L_1 и L_2;
- прием и запись данных, по меньшей

мере, от 8 спутников одновременно;

- запись данных с частотой 1/30 Гц и выше;
- маска отсечения спутников – 10 градусов над горизонтом и ниже;
- синхронность работы часов приемника по времени GPS с точностью ±1 мс.

Специальные рекомендации к антеннам перманентных станций:

- фазовый центр антенны должен быть точно известен для обеих частот;
- выполненная калибровка фазового центра антенны;
- точка крепления антенны должна быть отнивелирована;
- антенна должна быть прочно закреплена.

Выполнение этих рекомендаций при подготовке к работе перманентной станции позволяет получать данные с минимальными искажениями из-за влияния внешней среды в течение года (температурные колебания, колебания влажности тропосферы, поднятие-опускание грунта и т.п.) (IGS …).

Для определения региональной геодинамики необходимо создание густой сети GNSS станций, что требует высоких материальных затрат. Оптимальной стратегией является создание редкой сети перманентных станций, при создании параллельной сети станций с периодичным опросом в течение года. Требования к приемникам и антеннам, используемым для дискретных наблюдений, представляются те же, что и для перманентных станций.

Эксперименты показывают, что оптимальным временем наблюдения на пунктах с дискретным опросом являются сессии продолжительностью не менее 36 часов. Для корректного определения скоростей движений пунктов с дискретным опросом необходимы наблюдения не менее чем за три года (Зубович и др., 2001; Werner, 2002).

Программные комплексы для обработки наблюдений спутниковых навигационных систем

Для потребностей геодинамики и других задач, требующих высокой точности определения расстояний, существует несколько программных комплексов обработки, таких как GAMIT/GLOBK, GYPSY, Bernese. Нами был выбран пакет обработки GAMIT/GLOBK (рис. 1). Это программный пакет для всестороннего анализа GPS-данных, разработанный в MIT (Massachusetts Institute of Technology), Harvard-Smithsonian Center of Astrophysics и Scripps Institution of Oceanography, для вы-

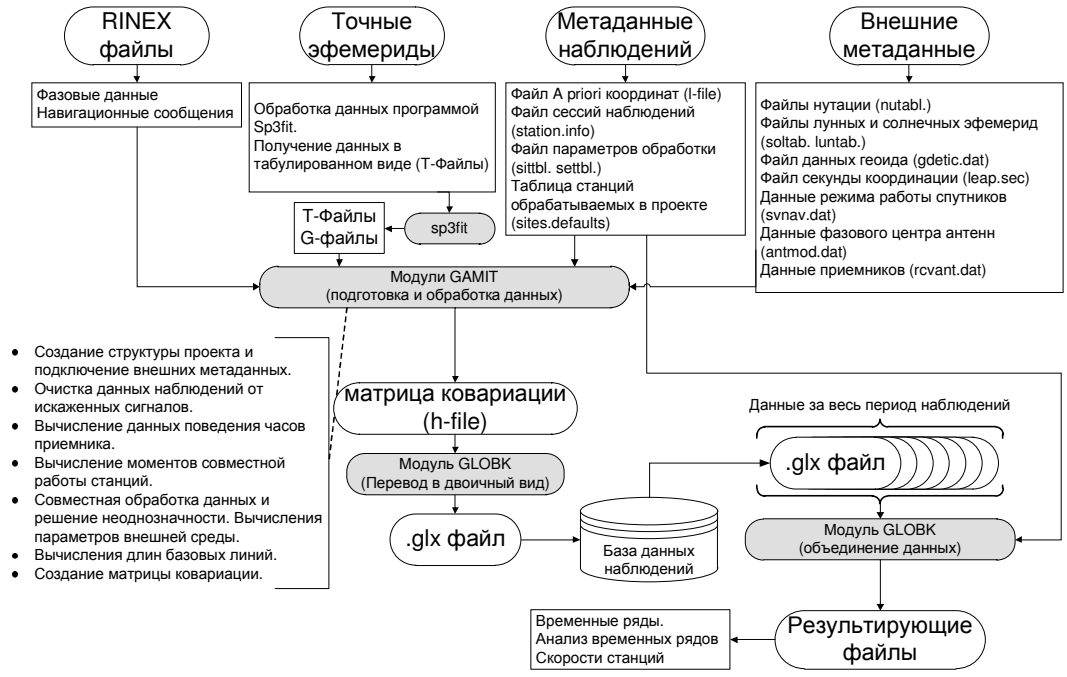

Рис. 1. Обработка GPS наблюдений в программном комплексе GAMIT/GLOBK

числения координат и скоростей станций. Программный комплекс работает в среде UNIX. В этом программном комплексе возможно учитывать всю a priori информацию о факторах, влияющих на точность вычислений координат: работу спутников и их точные орбиты, фазовые центры антенн, движения полюсов Земли, движение тектонических плит, влияние лунных и солнечных приливов (Herrin, King, 2008).

Подготовка данных для обработки

Перед началом обработки необходимо изучить соглашение именования файлов. Это соглашение позволяет разделять разные сессии наблюдений, легко организовывать файловые структуры данных и находить ошибки в обработке. Во-первых, все данные должны быть организованны по сессиям наблюдений, т.е. так, чтобы наблюдения, относящиеся к одному промежутку времени, были отделены от других данных. Самой удобной дискретизацией для обработки данных региональных сетей являются сессии длинной в одни астрономические сутки (начало суток считается по GMT).

Для начала обработки необходимо создать структуру файлов данных одной сессии. Для этого требуется создать каталог и скопировать туда следующие файлы:

1. RINEX файлы наблюдений.
2. Данные о координатах и скоростях станций, обрабатываемых в данной сессии (L-file).
3. Данные о приемниках и антеннах всех станций, обрабатываемых в данной сессии (station.info).
4. Список спутников и режимов работы спутников (session.info).
5. Файлы контроля и параметров анализа (sittbl., sestbl).
6. Файлы точных эфемерид спутников (G-file, T-file).
7. Глобальные файлы обработки:

a. Файл данных нутации (nutabl.).

b. Файлы лунных и солнечных эфемерид (luntab, soltab).

c. Файлы данных геоида (gdetic.dat).

d. Файл расхождения универсального и атомного времени UT1-UTC (leap.sec).

e. Характеристики спутников, приемников и антенн (svnav.dat, antmod.dat, rcvant.dat).

f. Файлы данных о вращении Земли (pole., ut1.).

g. Файлы данных океанических приливов (stations.oct, grid.oct).

RINEX файлы наблюдений

В результате работы приемника на пункте наблюдения получается файл, содержащий принятые навигационные сигналы и фазовые данные несущих волн со всех наблюдаемых спутников за все время работы. Как правило, каждый производитель GPS приемников поддерживает собственный формат записи данных. Для обработки данных их необходимо привести к формату, который будет правильно прочитан и интерпретирован программами обработки. На сегодняшний день стандартным форматом для обмена GPS данными является формат RINEX (Receiver Independent Exchange). Конвертацию данных в формат RINEX можно осуществлять как программными средствами, поставляемыми производителями с приемниками, так и свободно распространяемой программой TEQC. Нами используется программа TEQC, поскольку она позволяет работать с большинством современных GPS приемников. После подготовки RINEX файла с фазовыми данными к обработке необходимо правильно заполнить все поля заголовка корректной информацией согласно принятому формату (Werner, 2002).

Файл координат и скоростей станций

Данные о приближенных координатах станций содержатся в L-file. Эти данные необходимы для определения целого числа длин волн, при использовании фазового метода наблюдений.

Перед началом обработки необходимо внести в L-file координаты всех станций, обрабатываемых в данной сессии (Herring, King, 2008).

Файл данных о приемниках и антеннах на пунктах наблюдения

Данные обо всех приемниках и антеннах на пунктах, обрабатываемых в данной

сессии, необходимо внести в файл station. info. В файле содержится информация о времени начала и конца наблюдений, приемнике и его программном обеспечении, об антенне и отклонениях фазового центра. Также в файле содержится информация о высоте антенны, которая используется для проекции фазового центра над точкой наблюдений.

Перед началом обработки пользователь должен внести в файл station.info информацию о параметрах работы приемника и антенны (Herring, King, 2008).

Файл спутников и режима работы спутников

Данные о начальном моменте приема сигнала спутников, об интервалах записи, числе записанных эпох наблюдений и количестве используемых спутников находятся в файле session.info. Это файл используется при создании файлов X-file для каждой станции в сессии. Данный файл генерируется программой makex, входящей в состав пакета GAMIT (там же).

Файлы контроля и параметров анализа

Информация о весовых коэффициентах координат станций для решения задач уравнивания, угле отсечения для низколетящих спутников, об отклонении часов приемника содержится в файле контроля (sittbl.).

В обработке фазовых данных важно учитывать поведение радиоволн в различных средах и условиях внешней среды. Переменные, описывающие параметры окружающей среды, содержатся в файле данных сессии (sestbl.). В этот файл включена информация о стратегии разрешения неоднозначности целого числа длин волн, атмосферные параметры, орбитальные параметры спутников, данные об океанических приливах, параметры алгоритма очистки данных от шума (там же).

Файлы точных эфемерид спутников

Информация о точных эфемеридах спутников содержится в программе GAMIT в виде табличных файлов (T-file). Эти файлы содержат информацию о положении всех спутников с 15-ти минутным интервалом (там же). Файлы эфемерид могут быть загружены через Интернет с серверов центра обработки SOPAC.

Глобальные файлы обработки

Часть файлов используется в обработке всех сессий в течение года, такие файлы называются глобальными. Эти файлы обновляются один раз для всего года наблюдений или реже. Глобальные файлы необходимы для каждой сессии наблюдений (там же).

Файлы нутаций (nutabl.) содержат параметры нутации в табличной форме. Данные используются для трансформации между различными инерциальными системами Земли.

Файлы лунных и солнечных эфемерид (soltab., luntab.) содержат эфемериды луны и солнца на необходимый год в табличной форме.

Файл данных геоида (gdetic.dat) содержит информацию с определением стандартных параметров эллипсоида (большая полуось в метрах, коэффициент сжатия и смещение в метрах от геоцентра).

Файл секунды координации (leap.sec) содержит таблицу разницы времен TAI (Международное атомное время) и UTC (всемирное координированное время) с 1 января 1982 года.

Файлы характеристик спутников, приемников и антенн (svnav.dat, antmod.dat, rcvant.dat). Файл svnav.dat содержит таблицу данных о номере спутника, его массе и параметрах отклонения. Файл обновляется после каждого запуска нового спутника. Файл antmod.dat содержит информацию о смещениях фазового центра для каждой модели антенны. Файл rcvant.dat содержит информацию о приемниках, производителях и смещениях часов (Herring, King, 2008; International …).

Подготовка данных к обработке программным комплексом GAMIT

Перед обработкой данных необходимо создание структуры каталогов проекта GAMIT. Создание структуры каталогов, определяющей проект обработки данных GAMIT/GLOBK, производиться с помощью программы `links.com`. Результатом

успешного выполнения программы будет создание структуры каталогов и ссылок на глобальные файлы обработки. В проект обработки данных необходимо добавить файлы GPS наблюдений на станциях локальной сети и, по меньшей мере пять станций, входящих в сеть IGS.

Для создания вспомогательных файлов, используемых при обработке, необходимо выполнить программу makexp в рабочем каталоге проекта.

Пример запуска программы:

```
makexp -expt volc -orbt IGSF -yr
2009 -doy 182 -nav brdc1820.09n
-sinfo 30 00 00 2880
```

Здесь volc – название проекта (4 символа), IGSF – код типа используемых данных об орбитах спутников, 2009 – год проведения наблюдений, 182 – номер дня в который проводилось измерение, после ключа –nav указывается название файла с данными навигационного сообщения, далее с ключем –sinfo указывается продолжительность элементарного интервала в секундах (30), начало сессии в формате чч мм (00 00) и число эпох, обрабатываемых в проекте (2880).

После успешного исполнения программы makexp необходимо выполнить последовательность программ для создания файлов данных, необходимых для обработки.

Пример запуска программы:

```
makej brdc1820.09n jbrdc9.182
makex volc.makex.batch
fixdrv dvolc9.182
```

Программа makej создает файл данных отклонения часов на спутниках по информации из навигационного сообщения. Пример файла данных об отклонениях часов (J-файл) представлен на рис. 2.

На рис. 2 первые три строчки – это заголовок, в котором описывается формат данных и значения колонок. Каждая строка данных (начиная с четвертой) содержит информацию об отклонениях часов спутника на определенный момент. Отклонения часов спутников рассчитывается по формуле:

$$\Delta t_s = t'_s - t_s = a_0 + a_1(t - t_0) + a_2(t - t_0)^2,$$

где t'_s – время, полученное с данными со спутника (первые пять колонок), t_s – истинное время GPS (шестая и седьмая колонки, представлены в формате – неделя GPS, время в секундах с начала недели). Коэффициенты a_0, a_1, a_2 представлены в последних трех колонках J-файла.

После успешного завершения работы программы makej, необходимо запустить программу makex для создания X-файлов. Вспомогательные X-файлы являются основной организационной структурой обработки. X-файл создается на основе RINEX файла наблюдений для каждой станции, кроме того, данные наблюдений дополняются информацией о времени начала и конца сессии проекта (устанавливается при подготовке проекта), используемыми в обработке спутниками (некоторые спутники могут отбраковываться на основе информации из навигационного файла) и данными о длительности эпох (sampling interval) (Herring, King, 2008).

В завершении подготовки проекта, необходимо запустить программу fixdrv для создания пакетного файла обработки. Данная программа создает файл с определенной последовательностью запуска процедур обработки GPS данных, в качестве входных параметров для которых исполь-

```
YEAR  DOY HR MN SEC(UTC)   WKNO  SOW(GPST)        PRN   XEAF0          XEAF1          XEAF2
(i4,1x,i4,2i3,1x,f10.7,2x,i4,1x,f14.7,2x,i2.2,2x,3d16.8)
2009 182  1 59 29.0000000 1538 266384.0000000 01 -0.70127193D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182  3 59 45.0000000 1538 273600.0000000 01 -0.70095062D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182  5 59 45.0000000 1538 280800.0000000 01 -0.70063397D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182  7 59 45.0000000 1538 288000.0000000 01 -0.70031732D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182  9 59 45.0000000 1538 295200.0000000 01 -0.70000067D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182 11 59 45.0000000 1538 302400.0000000 01 -0.69968402D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182 13 59 13.0000000 1538 309568.0000000 01 -0.69937203D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
2009 182 13 59 45.0000000 1538 309600.0000000 01 -0.69937203D-04  0.44337867D-11  0.00000000D+00
```

Рис. 2. Пример J-файла

зуются созданные ранее вспомогательные файлы (Herring, King, 2008).

Обработка данных программным комплексом GAMIT

Для начала обработки необходимо запустить пакетный файл, в котором установлена последовательность всех запускаемых процедур с указанием файлов, в которых хранится информация. Каждая из запускаемых процедур обработки пишет информацию о статусе выполнения в файлы GAMIT.status, GAMIT.warning и GAMIT.fatal. В случае прерывания обработки из-за ошибки, по файлам статуса выполнения возможно быстро найти причину ошибки.

Перед началом расчетов результаты наблюдений очищаются от данных, искаженных вследствие отклонения спутников от орбит, либо сигналов, искаженных внешней средой. Это позволяет избежать искажения данных при среднесуточном усреднении.

Пример запуска программы:

```
yawtab yigsf9.182       tigsf9.182
yigsft.182       30
```

К очищенным данным применяются параметры, рассчитанные по моделям атмосферы (задержка радиосигнала в зените из-за влажности, давления, температуры и широты) (там же). Такой подход позволяет максимально уменьшить влияние тропосферы на результаты измерений.

Пример запуска программы:

```
model < bvolc9.002
```

После применения параметров, обусловленных влиянием внешней среды, данные очищаются от измерений, искаженных вследствие зашумления или переотражения радиосигнала. Искажения радиосигнала вблизи приемника вносит ошибку до 5 м (Wells, 1999) и поэтому нуждается в исключении из расчетов.

Пример запуска программы:

```
autcln  autcln.cmd.prefit  .
dvolc9.182    9 >! autcln.out
```

Данные, очищенные от искажений вследствие движения спутников, прохождения тропосферы и переотражения, обрабатываются программой solve для определения целого числа длин волн между спутником и приемником. Также с помощью программы solve происходит очистка данных от влияния ионосферы. Результатом выполнения программы solve является h-файл содержащий матрицу ковариации и используемый для дальнейшей обработки программой GLOBK (Herring, King, 2008).

Результаты обработки GAMIT

После успешного выполнения пакета процедур обработки GAMIT создаются файлы отчетов и промежуточных результатов. Важнейшими файлами, созданными в результате обработки, являются файлы контроля качества (Q-файлы) и файл, содержащий: координаты станции, решение неоднозначности целого числа циклов радиоволн, атмосферную модель и матрицу ковариации станций (H-файл) (там же). Q-файл используется для оценки качества решений. H-файл содержит «решение со слабыми ограничениями», т.е. координаты станций обработки не вычислены в какой-либо системе координат, однако расстояния базовых линий между станциями вычислены очень точно.

В дальнейшем данный «каркас» может быть спроектирован на любую систему координат (обработка программным комплексом GLOBK). H-файл является главным результатом работы программ из пакета GAMIT. В дальнейшем H-файл используется для обработки программным пакетом GLOBK.

Обработка данных программным комплексом GLOBK

Основная задача программного комплекса GLOBK – это объединение результатов обработки данных отдельных эпох и компаний наблюдений (результаты обработки программного комплекса GAMIT) и оценка координат станций за весь период наблюдений.

Входными данными для программного комплекса служат: координаты станций, решения неоднозначности целого числа циклов, атмосферная модель и матрица ковариации этих параметров (H-файлы, файл-результат конечной обработки программного комплекса GAMIT), параметры вращения Земли (файл данных pmu – дос-

тупен на сайте службы вращения Земли) (Herring, King, 2008), орбитальные параметры Земли (прецессия, нутация – доступен на сайте службы движения полюсов) (там же), начальные координаты некоторых станций из данного проекта и их скорости (станции стабилизации), рассчитанные из предыдущих наблюдений (itrf05.apr файл).

Для получения временных рядов координат станций используется процедура globk из комплекса GLOBK. Программа производит выборку и комбинирование данных с длинами базовых линий и скоростей их изменения между различными станциями обработки, после чего на некоторые станции из обработки (станции стабилизации) накладываются ограничения по координатам в определенную эпоху (координаты и скорости движения этих станций должны быть точно определены). Таким образом производится проецирование данного каркаса на определенную систему координат (там же).

Для вычисления скоростей станций используется процедура globk из комплекса GLOBK. Данная процедура производит усреднение данных за весь период наблюдений, оценивает как изменялись длины базовых линий между станциями за этот период наблюдений и вычисляет относительные скорости станций. Далее на некоторые станции из обработки (станции стабилизации) накладываются ограничения по координатам и скоростям. В зависимости от того, в какой системе координат были указаны скорости стабилизирующих станций, будут рассчитаны скорости всех станций в решении (там же). Например, можно указать скорости станций в системе ITRF 2005, тогда скорости всех станций будут подсчитаны в этой системе координат; однако для региональных проектов иногда удобнее и показательней использовать систему координат региона, тогда движение отдельных блоков становится более наглядным.

Поскольку вычисление скоростей станций и временных рядов координат производится независимо, то в случае коротких временных рядов (промежуток между измерениями меньше года) может быть расхождение между данными скоростей, полученных по аппроксимации временных рядов (из-за наложений сезонных и других периодичных смещений, влияющих на все станции в обработке), и данными, рассчитанными по скорости изменений базовых линий между станциями с помощью программы globk. В данном случае, для получения достоверного решения необходимо увеличивать продолжительность наблюдений.

Как показано в работах (Зубович и др., 2001; Овчаренко, Баландин, 2009а; Zubovich, 2002), для вычисления скоростей движений с точностью до 0,5 мм/год необходимы наблюдения в течение 3 лет и порядка 12 сессий наблюдений за данный период (для станций с дискретным опросом) (Овчаренко, Баландин, 2009а).

Пример обработки данных GPS наблюдений профиля Кытлым-Сысерть

С 2006 года ведется работа по широкомасштабному изучению современных движений земной коры на Урале с помощью методов космической геодезии. В сеть GPS мониторинга входят несколько перманентных станций и большое число пунктов с дискретным опросом.

В данной работе представлен результат обработки данных по профилю Кытлым-Сысерть вдоль среднего Урала. Все измерения на пунктах наблюдения были проведены сотрудниками лаборатории ядерной геофизики Института геофизики УрО РАН (Баландин и др., 2009; Овчаренко, Баландин, 2009а; 2009б; Уткин и др., 2010).

Последняя компания измерений по данному полигону была проведена в октябре 2009 года. Измерения проводились с использованием GPS приемника Trimble 5700, оснащенного антенной Trimble Zephyr Geodetic. Стандартная сессия наблюдений имеет продолжительность 24 часа и более.

Перед началом обработки данных было оценено качество данных и определена сеть стабилизирующих станций (все стабилизирующие станции включены в сеть

IGS), получены данные для всех станций IGS, участвующих в обработке, заполнены все вспомогательные таблицы метаданных, произведено редактирование данных всех станций сети. В качестве стабилизирующих станций в обработке использовались:

станция ARTU (Арти, Свердловская обл.);

станция NRIL (Норильск, Красноярский край);

станция POL2 (Бишкек, Кыргызстан);

станция KIT3 (Китаб, Узбекистан);

станция SVTL (Светлогорск, Ленинградская обл.);

станция SODA (Соданкиля, Финляндия);

станция NVSK (Новосибирск, Новосибирская обл.).

Результатом обработки являются значения координат за весь период наблюдений, объединенные во временные ряды по трем компонентам – северная, восточная и высотная.

Пример временного ряда для станции VOLC, полученного после обработки данных наблюдений в программном комплексе GAMIT/GLOBK, показан на рис. 3.

Определение вертикальной (высотной) компоненты, в силу физических особенностей систем спутниковой навигации, связано с самыми большими ошибками.

Кроме того, вследствие методологии наблюдений (дискретные наблюдения подразумевают переустановку антенны для каждого наблюдения в точке), высота установки антенны уникальна для каждого нового наблюдения. Поэтому мы заранее отказываемся от определения скорости изменения высоты в точке наблюдений и считаем, что вертикальные движения должны изучаться другими технологиями мониторинга, либо более дорогостоящей стратегией наблюдений.

По результатам наблюдений были получены значения скоростей изменения координат в системе координат ITRF2005, приведенные в таблице 1.

```
Globk Analysis
VOLC_GPS to N Solution  1 +   6326016.672 m

 2006  7  7 11 59   6326016.67214    0.00274   -0.00107   0.00274
 2006  7  8 11 59   6326016.67460    0.00186    0.00137   0.00186
 2007  8  6 11 59   6326016.67544    0.00210   -0.00237   0.00210
 2008  6 19 11 59   6326016.68249    0.00196    0.00098   0.00196
 2009  7  1 11 59   6326016.68601    0.00210    0.00012   0.00210

Wmean    6326016.6786 m +- 0.0025 from    5 data. WRMS   5.6 mm, NRMS  2.68
Slope     4.25 +-     0.82 mm/yr, WRMS   1.8 mm, NRMS  0.86, dur  2.98 <> 2007.77 yr

Globk Analysis
VOLC_GPS to E Solution  1 +   3654711.693 m

 2006  7  7 11 59   3654711.69349    0.00212    0.00163   0.00212
 2006  7  8 11 59   3654711.69179    0.00147   -0.00013   0.00147
 2007  8  6 11 59   3654711.71837    0.00166    0.00062   0.00166
 2008  6 19 11 59   3654711.73568    0.00151   -0.00292   0.00151
 2009  7  1 11 59   3654711.76558    0.00173    0.00227   0.00173

Wmean    3654711.7214 m +- 0.0135 from    5 data. WRMS  30.1 mm, NRMS 18.19
Slope    23.94 +-     0.95 mm/yr, WRMS   2.4 mm, NRMS  1.44, dur  2.98 <> 2007.75 yr

Globk Analysis
VOLC_GPS to U Solution  1 +       518.349 m

 2006  7  7 11 59       518.34914    0.01613    0.01192   0.01613
 2006  7  8 11 59       518.34757    0.00690    0.01031   0.00690
 2007  8  6 11 59       518.33174    0.00802   -0.02114   0.00802
 2008  6 19 11 59       518.35641    0.00772   -0.00907   0.00772
 2009  7  1 11 59       518.39378    0.00782    0.01336   0.00782

Wmean        518.3566 m +- 0.0108 from    5 data. WRMS  24.1 mm, NRMS  2.92
Slope    14.48 +-     6.98 mm/yr, WRMS  17.8 mm, NRMS  2.16, dur  2.98 <> 2007.85 yr
```

Рис. 3. Пример временного ряда

Таблица 1. Скорости движения станции GPS

Название станции	Широта (градусы)	Долгота (градусы)	Скорость, северная компонента (мм/год)	Скорость, восточная компонента (мм/год)	Число измерений
ARTU	56,430	58,560	6,72 ± 0,02	24,51 ± 0,02	более 3000
KYTL	59,499	59,208	5,50 ± 1,31	25,45 ± 1,01	5
SINY	58,132	59,631	5,96 ± 2,46	24,15 ± 1,86	3
SYSE	56,500	60,799	6,51 ± 1,41	27,45 ± 1,07	5
VISI	57,656	59,522	8,97 ± 2,13	26,91 ± 1,66	4
VOLC	56,828	60,004	4,25 ± 0,82	23,95 ± 0,66	5

По профилю Кытлым-Сысерть была составлена карта скоростей пунктов GPS мониторинга за период 2006–2009 гг. (рис. 4).

Из представленных результатов видно, что все вектора движений GPS-станций направлены на восток-северо-восток и направления станций практически совпадают в пределах эллипсов доверительных интервалов. Кроме того, вычисленные скорости мобильных станций незначительно отличаются от скоростей перманентных станций ARTU и EKTB. Это свидетельствует о корректности методики сбора данных на станциях и единстве регионального движения региона.

На графиках, построенных по результатам обработки (рис. 5), видно, что северная компонента движения имеет значения в 5 раз меньшее, чем восточная.

При одинаковой величине ошибок у обоих компонент это приводит к большему искажению результатов по северной компоненте.

Необходимо отметить, что согласно эмпирическим исследованиям, для достоверности определения скоростей в пределах 1 мм необходимо не менее 12 наблюдательных компаний в течение, как минимум, 3 лет (Зубович и др., 2001; Werner Gurtner, 2002).

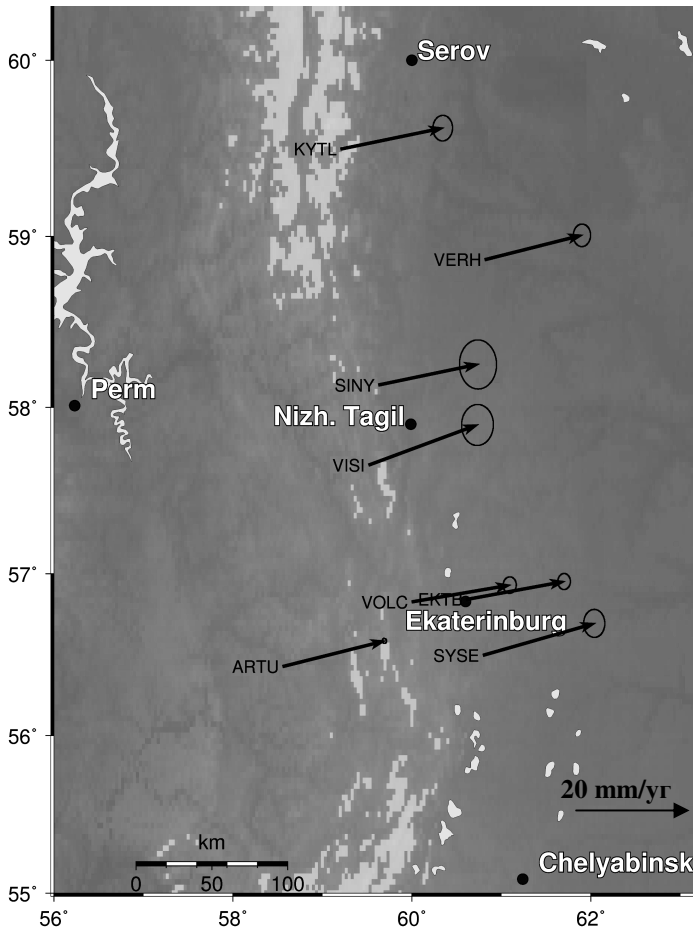

Рис 4. Карта скоростей пунктов GPS мониторинга по профилю Кытлым-Сысерть за период 2006–2009 гг.; станции ARTU (ИГФ УрО РАН) и EKTB (ИГД УрО РАН) являются перманентными станциями

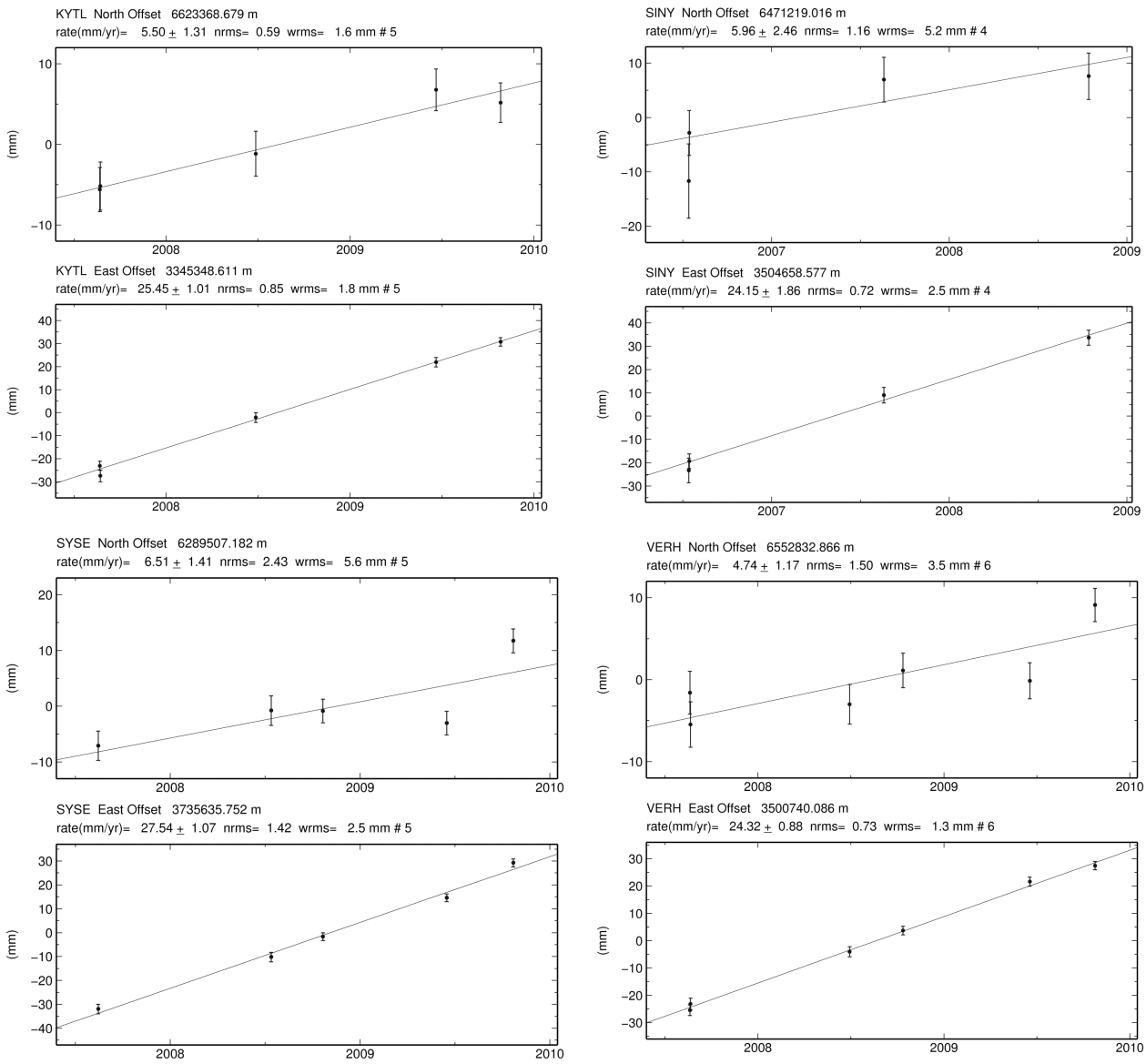

Рис. 5. Временные ряды изменений координат станций GPS-мониторинга

Заключение

В статье описана методика сбора и обработки данных наблюдений спутниковых навигационных систем и приведен пример применения описанных методов для получения данных о геодинамике в уральском регионе. Применение описанных методик позволило определить скорости тектонических движений отдельных литосферных блоков в уральском регионе. На данный момент установлено, что скорости станций с периодическим опросом в направлении восток-запад составляют 24–28 мм/год, а в направлении север-восток – 4–9 мм/год, что совпадает с данными, зарегистрированными перманентной станцией ARTU.

Работа выполнялась в рамках интеграционного проекта 09-И-5-2005 УрО РАН.

Литература

Баландин Д.В., Белоусова (Ситникова) А.А., Тягунов Д.С., Катанчик Д.Л. Уточненные результаты исследования геодинамики Северного и Среднего Урала // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Пятые науч. чт. памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. С. 442–445.

Зубович А.В., Трапезников Ю.А., Брагин В.Д., Щелочков Г.Г., Рыбин А.К. Поле деформаций, глубинное строение земной коры, про-

странственное распределение сейсмичности Тянь-Шаня // Геология и геофизика. 2001. Т. 42, № 10. С. 1634–1640.

Овчаренко А.В., Баландин Д.В. Высокоточный мониторинг на Среднем Урале // Вопросы теории и практики геологической интерпретации гравитационных, магнитных и электрических полей: материалы XXXVI сессии Международного семинара. Казань 26-31 января 2009. Казань: КазГУ, 2009а. С. 402–405.

Овчаренко А.В., Баландин Д.В. Первые результаты площадного высокоточного GPS-мониторинга // Геодинамика. Глубинное строение. Тепловое поле Земли. Интерпретация геофизических полей: Пятые науч. чт. памяти Ю.П. Булашевича. Екатеринбург: УрО РАН, 2009б. С. 375–378.

Уткин В.И. Новейшая геодинамика и наследованное движение Евро-Азиатского континента // Уральский геофизический вестник. 2003. № 5. С. 78–83.

Уткин В.И., Белоусова А.А., Тягунов Д.С., Баландин Д.В. Исследование геодинамики Северного и Среднего Урала по данным GPS // ДАН. 2010. Т. 431, № 2. С. 246–251.

Herring T.A., King R.W. GAMIT/GLOBK manual. M.I.T. 2008. 68 p.

IGS Site Guideline / IGS Central Bureau. Jet Propulsion Lab Caltech. URL: http://igscb.jpl.nasa.gov/network/guidelines/guidelines.html

International Earth Rotation and Reference Systems Service / IERS. URL: http://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/data.html .

Wells D. Guide of GPS Positioning. Dep. Of Geodesy and Geomatics Engineering University of New Brunswick. 1999. 210 p.

Werner Gurtner. RINEX. The Receiver Independent Exchange Format. Version 3.00. Astronomical Institute. University of Bern. 2002. 32 p.