

Обработка ГНСС-наблюдений в ИПА РАН

© В. В. Суворкин, И. С. Гаязов, С. Л. Курдубов

ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Регулярное определение параметров вращения Земли из обработки наблюдений, получаемых с использованием различных методов космической геодезии, является одной из основных задач, решаемых в ИПА РАН в режиме службы. Обработка наблюдений спутников GPS в рамках службы ПВЗ была начата в 2000 г. с использованием разработанного в Институте программного пакета, главная особенность которого заключалась в формировании тройных разностей фазовых измерений. Применение этого подхода позволяло эффективно использовать пакет для определения минимально необходимого набора параметров (ПВЗ, параметров орбит спутников и тропосферы), располагая достаточно скромными вычислительными ресурсами. Однако применяемая методика формирования тройных разностей, закономерно приводящая к значительному возрастанию дисперсии таких измерений, ограничивала дальнейшее повышение точности результатов, несмотря на привлечение наблюдений большего числа станций и на улучшение используемых моделей. Поэтому в 2011 г. была начата разработка новой версии программного пакета, основанной на схеме обработки измерений без формирования их разностей. Такая схема обработки наблюдений позволяет определять наиболее полный набор параметров: ПВЗ, являющиеся основным продуктом в рамках службы, параметры орбит спутников, параметры тропосферной задержки сигнала и поправки часов станций и спутников.

В статье представлены основные характеристики нового программного пакета, используемого в службе ПВЗ с 2014 г. Дан краткий обзор используемых моделей, которые в основном соответствуют рекомендациям IERS. Приведены особенности алгоритма предварительной обработки и фильтрации измерений, схемы параметризации, формирования и решения системы нормальных уравнений с использованием двухгруппового метода наименьших квадратов, а также особенности реализации временной шкалы.

С использованием разработанного пакета в рамках службы ПВЗ ежедневно обрабатываются наблюдения GPS-и ГЛОНАСС-спутников на станциях глобальной сети. В статье кратко описаны режимы обработки наблюдений и приведены оценки характеристик основных результатов. Сравнение результатов с данными международных служб показывает высокую точность получаемых ПВЗ, орбит спутников, параметров тропосферы и поправок часов.

Ключевые слова: параметры вращения Земли, глобальные навигационные спутниковые системы, обработка наблюдений, программный пакет, определение параметров.

Контакты для связи: Суворкин Владимир Валерьянович (suvorkin@iaaras.ru).

Для цитирования: Суворкин В. В., Гаязов И. С., Курдубов С. Л. Обработка ГНСС-наблюдений в ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2022. Вып. 61. С. 28–37.

<https://doi.org/10.32876/ApplAstron.61.28-37>

GNSS Observations Processing at the Institute of Applied Astronomy

V. V. Suvorkin, I. S. Gayazov, S. L. Kurdubov

Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences, Saint Petersburg, Russia

Abstract

One of the main tasks solved at the IAA RAS in the service mode is regular determination of Earth rotation parameters from processed observations obtained using various space geodetic methods. The processing of GPS satellite observations was started in 2000 within the EOP service framework using a software package developed at the Institute. The main feature of the package was the formation of triple differences of phase measurements. This approach made it possible to use the package efficiently to determine the minimum necessary set of parameters (EOP, satellite orbit and troposphere parameters) having rather modest computing resources. However, the applied triple difference forming technique, which naturally leads to a significant increase of measurement variances, limited further increase in the accuracy of the results, despite attracting more station observations and improving the models used. Therefore, in 2011 the Institute began the development of a new software package version based on the measurements processing scheme without forming measurement differences. This observation processing scheme allows to determine the most complete set of parameters: EOPs, which are the main product within the service, satellite orbit parameters, tropospheric delay parameters and station and satellite clock correction.

The article represents the main characteristics of the new software package used in the EOP service since 2014. It gives a brief overview of the used models which mostly comply with IERS recommendations. Besides, it indicates the

features of the preliminary processing and measurements filtering algorithm, parameterization scheme, formation and solution of the normal equations system using the two-group least squares method, as well as the features of the time scale implementation.

Using the developed package, GPS and GLONASS satellite observations from global network stations are processed daily within the framework of the EOP service. The article briefly describes the data processing modes and provides the characteristics of the main results. Comparison of the results with the data from international services shows high accuracy of the obtained EOPs, satellite orbits, troposphere parameters and clock corrections.

Keywords: Earth rotation parameters, global navigation satellite systems, observational data processing, software, parameter determination.

Contacts: Vladimir V. Suworkin (suworkin@iaaras.ru).

For citation: Suworkin V. V., Gayazov I. S., Kurdubov S. L. GNSS Observations Processing at the Institute of Applied Astronomy // Transactions of IAA RAS. 2022. Vol. 61. P. 28–37.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.61.28-37>

Введение

Одной из основных задач Института прикладной астрономии (ИПА) РАН является определение ПВЗ из обработки наблюдений, получаемых с использованием различных методов космической геодезии: РСДБ, лазерной локации спутников и наблюдений спутников ГНСС. Для обработки указанных типов наблюдений в Институте были написаны программные пакеты, которые используются как в режиме работы службы ПВЗ, когда обрабатываются достаточно короткие серии наблюдений (от одного часа до нескольких суток) для оперативного определения ПВЗ, так и для уравнивания рядов наблюдений на длительных интервалах времени.

В 2000 г. в ИПА РАН была запущена служба оперативной обработки наблюдений GPS-спутников при помощи программного пакета GRAPE (Гаязов, 2001). В этом пакете использовался режим так называемых тройных разностей, в котором благодаря составлению последовательных разностей измерений по определенной схеме из уравнений наблюдений исключается ряд параметров, таких как фазовые неоднозначности и поправки часов спутников и станций. Это позволяло сократить число определяемых параметров до минимума и с использованием весьма ограниченных вычислительных ресурсов оперативно обрабатывать суточные серии наблюдений спутников GPS. В рамках службы определения ПВЗ ежедневно обрабатывались наблюдения 35–40 станций глобальной сети. Также пакет GRAPE использовался для решения частных задач, таких как уточнение координат станций из обработки наблюдений региональных сетей, уточнение модели влияния светового давления на движение навигационных спутников. Основным недостатком метода, основанного на формировании тройных разностей фазовых измерений, заключался в значительном возрастании дисперсии таких измерений, и это оставалось основным фактором, ограничивающим точность получаемых результатов, несмотря на улучшение используемых моделей.

С целью повышения точности результатов определения ПВЗ в 2011 г. было принято решение провести коренную модернизацию средств обработки ГНСС-наблюдений в службе ПВЗ, и была начата разработка новой версии программного пакета, основанной на схеме обработки измерений без формирования их разностей. Новый программный пакет был внедрен в работу службы ПВЗ в феврале 2014 г. Вместе с ПВЗ, являющимися основным результатом работы службы, с помощью пакета определяются орбиты спутников, параметры тропосферной задержки сигнала, а также поправки часов станций и спутников.

Основные характеристики нового программного обеспечения

Новый программный пакет обработки ГНСС-наблюдений написан на языках C++, Fortran и предназначен для обработки суточных серий ГНСС-наблюдений региональных и глобальных сетей станций. Служебные скрипты, используемые в основном для сбора данных, реализованы на языке Python. При проектировании пакета был определен ряд принципов, положенных в основу разработки проекта:

1. Блочная структура: в программе есть блоки чтения данных, блок редукиций наблюдений, орбитальный блок и т. д., которые могут быть изменены независимо от других блоков, а также используются автономно в некоторых случаях, например для тестовых вычислений.

2. Простая схема добавления и замены используемых моделей.

3. Гибкая система параметризации: простота в изменении состава уточняемых параметров и в формировании заданий для обработки.

На всех этапах обработки используются модели, рекомендованные международными службами IGS и IERS. Ниже представлены основные сведения о моделях и подходах, используемых в программе.

— *Основные измерения*: используются безразностные ионосферно-свободные комбинации фазовых и кодовых измерений с интервалом 30 с.

— *Предварительная обработка данных*: проводится анализ комбинаций Мельбурна – Вуббена (Blewitt, 1990) кодовых и фазовых измерений для поиска ошибок потери цикла, удаления ошибочных измерений и формирования дуг прохождений спутников.

— *Модель координат станций*: используются априорные координаты и скорости, полученные из комбинированных решений в системе IGB08 (IGS Reference Frames) с вычисляемыми поправками за твердотельный прилив, океаническую нагрузку и полюсные приливы.

— *Геометрическая модель*: учитываются смещения фазовых центров антенны приёмника относительно геодезического маркера станции и антенны излучателя относительно центра масс спутника с учётом направлений излучения и приёма сигнала по модели IGS08.atx и эффект взаимной ориентации антенн приёмника и излучателя (wind-up effect) (Wu, 1993).

— *Распространение сигнала*: определяются зенитная полная тропосферная задержка сигнала с картирующими функциями GMF (Boehm, 2006) и горизонтальные градиенты тропосферной задержки с картирующей функцией Херринга (Herring, 1992).

— *Релятивистские эффекты*: учитываются эффект Шапиро, коррекции часов спутников и релятивистское ускорение спутника.

— *Эфемериды тел Солнечной системы*: используются созданные в ИПА РАН эфемериды EPM (Pitjeva, 2017).

— *Переход между земной и небесной системами координат*: используется модель прецессии и нутации IAU 2006/2000A, учитываются внутрисуточные вариации координат полюса и Всемирного времени согласно рекомендациям IERS (IERS Conventions, 2010).

Модель движения спутника

Движение спутника моделируется в инерциальной небесной геоцентрической системе координат. Уравнения движения записываются следующим образом:

$$\ddot{\mathbf{r}}(t) = \mathbf{T} \text{grad} (V(\mathbf{r}) + \delta V(\mathbf{r}, t)) + \mathbf{a}_{tb}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{a}_{rel}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t) + \mathbf{a}_{srp}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t, p_0, p_1, \dots),$$

где \mathbf{r} — радиус-вектор спутника, \mathbf{T} — матрица перехода от земной системы координат к небесной, V — статический геопотенциал, δV — возмущённый геопотенциал на эпоху t в точке \mathbf{r} , \mathbf{a}_{tb} — суммарное ускорение от тел Солнечной системы, \mathbf{a}_{rel} — постньютоновская коррекция первого порядка, \mathbf{a}_{srp} — ускорение от солнечного светового

давления, которое определяется через параметры эмпирической модели $\langle p_0, p_1, \dots \rangle$.

Статический геопотенциал вычисляется с использованием конвенционной модели EGM2008 (ограниченной до гармоник степени и порядка 12) с учётом вековых изменений коэффициентов для гармоник низших степеней, вычисляемых по рекомендованным IERS выражениям.

Возмущённый потенциал δV представляется в виде поправок к стоковым коэффициентам разложения геопотенциала, обусловленных эффектами твердотельных и океанических лунно-солнечных приливов, твердотельных и океанических полюсных приливов.

Для вычисления \mathbf{a}_{tb} используются эфемериды EPM.

Для учёта светового давления используется модель, предложенная Европейским центром определения орбит CODE (Arnold, 2015). Эта модель является полностью эмпирической и не содержит какой-либо априорной части. Компоненты силы светового давления представляются в следующем виде:

$$F_i = s(p_0 + p_1 \cos(2 \Delta u) + p_2 \sin(2 \Delta u) + p_3 \cos(4 \Delta u) + p_4 \sin(4 \Delta u)),$$

$$F_j = sp_5,$$

$$F_k = s(p_6 + p_7 \cos(\Delta u) + p_8 \sin(\Delta u)),$$

где $\Delta u = u - u_s$, u — аргумент широты спутника, u_s — аргумент широты проекции геоцентрического радиус-вектора Солнца на плоскость орбиты, s — функция тени, имеющей коническую форму. Индексы i, j, k обозначают соответствующие компоненты вектора в спутникоцентрической солнечно-ориентированной системе отсчёта, в которой орт $\hat{\mathbf{i}}$ направлен на Солнце, орт $\hat{\mathbf{j}}$ направлен вдоль солнечных панелей, а орт $\hat{\mathbf{k}}$ дополняет тройку векторов до правосторонней системы. Коэффициенты $\langle p_0, p_1, \dots, p_8 \rangle$ все или частично оцениваются в процессе определения орбиты. Экспериментальным путем было установлено, что для спутников GPS без существенной потери точности определения орбит коэффициенты p_1, p_2, p_3 и p_4 можно приравнять нулю и не включать в набор определяемых параметров.

Орбиты спутников строятся на 24-часовом интервале. Для определения предварительной траектории для каждого спутника оцениваются значения начальных координат и скоростей и коэффициентов p_i , проводя орбиту по сетке точек из бортовых эфемерид или эфемерид третьих центров анализа. Также в этом процессе определяются априорные значения ПВЗ. В дальнейшем эти параметры переопределяются наряду с другими параметрами в процессе итерационного уточнения.

Особенности параметризации

Для оценки параметров используется двух-групповой метод наименьших квадратов (МНК) (Губанов, 1997). Использование этого метода позволяет существенно сократить размеры матриц нормальных уравнений и избежать потери точности по сравнению с использованием классического МНК в таких условиях.

Модель наблюдений в таком случае представляется следующим образом:

$$\begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ \vdots \\ l_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & B_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_N \end{bmatrix},$$

где l_k — это векторы невязок (разностей измеренных и соответствующих вычисленных величин) для отдельного набора наблюдений, A_k и B_k — матрицы частных производных для соответственно первой и второй группы параметров, v_k — векторы ошибок. Индекс k обозначает номер текущего набора из N наборов уравнений. Параметры первой группы (x) — общие для всех наблюдений (так называемые глобальные параметры), а параметры второй группы, относящиеся к векторам y_k , — индивидуальны для каждого k -го набора уравнений (локальные).

Система нормальных уравнений в матричном виде принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} F & H_1 & \dots & H_N \\ H_1^T & G_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_N^T & 0 & \dots & G_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y}_1 \\ \vdots \\ \hat{y}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f \\ g_1 \\ \vdots \\ g_N \end{bmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} F &= \sum_k A_k^T Q_k^{-1} A_k, & f &= \sum_k A_k^T Q_k^{-1} l_k, \\ G_k &= B_k^T Q_k^{-1} B_k, & H_k &= A_k^T Q_k^{-1} B_k, \\ g_k &= B_k^T Q_k^{-1} l_k, \end{aligned}$$

и Q — матрица весов.

В итоге глобальные параметры и группы локальных параметров определяются по следующим формулам:

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \left(F - \sum_k H_k G_k^{-1} H_k^T \right)^{-1} \left(f - \sum_k H_k G_k^{-1} g_k \right), \\ \hat{y}_k &= G_k^{-1} (g_k - H_k^T \hat{x}). \end{aligned}$$

В нашей модели в качестве k выбран номер эпохи внутри суток: каждое уравнение относится к определённой эпохе, отсчитываемой от начала суток, и с учётом 30-секундного шага обрабатываемых наблюдений получается $N = 2880$ наборов уравнений за сутки. Таким образом, к первой группе параметров (x) относятся те, значения ко-

торых постоянны в течение суток (суточные параметры). Параметры второй группы (y_k) определяются независимо для каждого момента времени k . Таким образом, «локальность» и «глобальность» понимаются во «временном» смысле.

Все суточные параметры представляются в виде полиномов и оцениваемыми параметрами являются их коэффициенты. Такой подход позволяет рассматривать любой из параметров как постоянный, так и изменяющийся в течение суток. При такой параметризации удобно автоматизируется процесс вычисления частных производных. Для полиномиальной параметризации используются ортогональные многочлены Чебышева:

$$\begin{aligned} T_0(x) &= 1, \\ T_1(t) &= t, \\ T_{n+1}(t) &= 2tT_n(t) - T_{n-1}(t). \end{aligned}$$

В настройках программы для каждого суточного параметра задаётся максимальная степень полинома. Каждый параметр имеет признак, который указывает его принадлежность к спутнику, к станции, или того, что он является глобальным. По совокупности этих признаков определяются число параметров в каждой группе и структура матрицы условных уравнений. Например, зенитная тропосферная задержка в течение суток представляется полиномом 12-й степени. Это означает, что количество глобальных тропосферных параметров в обрабатываемой серии будет равняться $12n$, где n — количество станций. Если же задать зенитную задержку как локальный параметр, т. е. оценивать независимо на каждый момент времени, то количество параметров при 30-секундном шаге наблюдений будет $2880n$.

Основные уравнения для фазовых (обозначено как L) и кодовых (R) ионосферно-свободных комбинаций измерений, выраженных в линейной мере, имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} L &= c\tau + c(\delta t_{sta} - \delta t^{sat}) + T + P + D + N + W + B, \\ R &= c\tau + c(\delta t_{sta} - \delta t^{sat}) + T + P + D + B, \end{aligned}$$

где τ — время прохождения сигнала от спутника к приемнику, c — скорость света, δt_{sta} и δt^{sat} — ошибки часов станции и спутника соответственно, T — тропосферная задержка сигнала, P — коррекция за положение фазовых центров антенн излучателя и приёмника, D — поправка за релятивистские эффекты, N — вещественная фазовая неоднозначность (точнее, комбинация неоднозначностей фаз на двух частотах), W — коррекция за эффект, обусловленный взаимной ориентацией антенн спутника и станции (wind-up effect), B — межсистемный сдвиг.

Время прохождения сигнала (τ) для каждого наблюдения получается из решения следующего уравнения:

$$c\tau = \|\mathbf{r}_{sta}(t) - \mathbf{r}^{sat}(t - \tau)\|,$$

где \mathbf{r}_{sta} и \mathbf{r}^{sat} — соответственно положения станции и спутника в одной и той же системе координат, причём положение станции определено на момент приёма t , а положение спутника — на момент излучения сигнала $t - \tau$.

В качестве априорных значений параметров (положения спутников, ПВЗ) можно использовать данные бортовых сообщений спутниковых систем, прогнозы на основе решений для предыдущих суток или данные из решений других центров анализа.

Предполагается, что наблюдения всех станций и спутников являются равноточными, но при этом кодовым измерениям в силу их худшей точности присваивается вес $1/200$ по сравнению с единичным весом фазовых измерений.

Предварительная обработка и фильтрация измерений

В процессе предварительной обработки наблюдений проводится фильтрация измерений (удаление выбросов и неполных наблюдений, например с отсутствующей записью на одной из частот) и построение дуг прохождений спутников. Эти операции проводятся в рамках одной процедуры. Из измерений составляются комбинации Мельбуерна – Вуббена:

$$L_{MW} = \chi_1 \cdot L_1 + \chi_2 \cdot L_2 + \chi_3 \cdot R_1 + \chi_4 \cdot R_2,$$

где R_1, R_2 — кодовые измерения, а L_1 и L_2 — фазовые измерения, выраженные в линейной мере, а их индексы означают номер частоты. Коэффициенты χ_l являются комбинациями значений несущих частот f_1 и f_2 :

$$\chi_1 = \frac{f_1}{f_1 - f_2}, \quad \chi_2 = -\frac{f_2}{f_1 - f_2},$$

$$\chi_3 = -\frac{f_1}{f_1 + f_2}, \quad \chi_4 = -\frac{f_2}{f_1 + f_2}.$$

В одно прохождение спутника включается последовательный ряд фазовых измерений, для которых сохраняется значение фазовой неоднозначности. Прерывание ряда или появление ошибки потери цикла трактуется как окончание дуги.

С использованием рекурсивной формулы, последовательно для каждого i -го наблюдения «станция — спутник» вычисляются среднее значение $\langle M_{LMW} \rangle_i$ и стандартное отклонение S :

$$\langle M_{LMW} \rangle_i = \frac{i-1}{i} \langle M_{LMW} \rangle_{i-1} + \frac{1}{i} L_{MWi},$$

$$S_i^2 = \frac{i-1}{i} S_{i-1}^2 + \frac{1}{i} (L_{MWi} - \langle M_{LMW} \rangle_{i-1})^2,$$

$$S_0 = \frac{c}{2(f_1 - f_2)}.$$

На каждом шаге проверяется неравенство $|L_{MWi} - \langle M_{LMW} \rangle_{i-1}| < mS_{i-1}$, где m — множитель, установленный равным 10 на основе экспериментального подбора. В случае, если оно неверно, такое наблюдение трактуется как выброс, либо как начало новой дуги прохождения спутника после потери цикла. При этом индекс i обнуляется и процедура поиска продолжается на оставшемся массиве наблюдений.

Также в целях уменьшения влияния эффекта многолучевости отбрасываются наблюдения на низких высотах над горизонтом (менее 7°). В результате предварительной обработки формируется массив спутниковых прохождений для всех спутников, наблюдаемых каждой станцией, а также индексы соответствующих этим наблюдениям фазовых неоднозначностей, которые будут определены в результате последующих вычислений.

Реализация временной шкалы

При оценке поправок часов станций и спутников возникает проблема выбора опорного значения, к которому будут отнесены поправки. В случае, когда поправки часов оцениваются как параметры на каждую эпоху, матрицы \mathbf{B}_k в модели наблюдений получаются вырожденными. Поэтому один из параметров — поправка часов произвольной станции или спутника на данную эпоху — фиксируется. Это означает, что все остальные поправки часов на эту эпоху определяются относительно выбранных таким образом часов. Хотя в уравнение измерений поправки часов станции и спутника входят в виде разности, которая инвариантна относительно опорного значения шкалы, для других параметров ошибка поправки времени в абсолютном значении приводит к существенным отклонениям. Например, это относится к вычислению положения спутника в момент приёма сигнала и, соответственно, времени прохождения сигнала. Чтобы уменьшить эту ошибку, мы относим все часы к некоторой динамической шкале времени, которая определяется на каждую эпоху t как набор средних значений поправок часов спутников:

$$b_{mean} = \frac{1}{n} \sum_s a_0^s + (t - t_0)a_1^s + (t - t_0)^2 a_2^s,$$

где a_0^s, a_1^s и a_2^s — соответственно смещение, ход часов и скорость ухода, отнесённые к эпохе t_0 , для спутника, соответствующего индексу s ; их значения берутся из навигационных сообщений ГНСС. Число n — количество спутников, наблюдаемых в рассматриваемую эпоху t . Получившееся среднее значение вычитается из всех значений определённых поправок часов на эпоху t . Поскольку при обработке больших сетей станций на каждую эпоху присутствуют наблюдения всех спутников, построенная таким образом шкала близка к систем-

ной шкале, реализуемой в среднем бортовыми шкалами. При совместной обработке измерений спутников ГЛОНАСС и GPS построение такой шкалы производится только по спутникам одной из систем. Как правило, предпочтение отдаётся GPS из-за более высокой стабильности бортовых часов.

Учет тропосферной задержки

Тропосферная задержка T сигнала по лучу зрения моделируется следующим образом:

$$T(e) = ZPD_d \cdot m_d(e) + ZPD_w \cdot m_w(e) + m_g(e) \cdot [G_N \cos(a) + G_E \sin(a)],$$

где ZPD (zenith path delay) — задержка сигнала в зените, m — картирующая функция, зависящая от угла места e . Индекс d относится к гидростатической компоненте задержки, индекс w — к влажной, индекс g к градиентной. G_N , G_E — значения градиентов в северном и восточном направлениях, a — азимут. В программе предусмотрена возможность одновременного определения и сухой и влажной компоненты задержки. В этом случае возникают плохо обусловленные нормальные матрицы по причине близких значений картирующих функций, и поэтому значения частных производных заменяются на их сумму и разность. Если определяется только одна компонента или полная задержка, используется картирующая функция для сухой компоненты задержки.

Обработка ГНСС-наблюдений в службе ПВЗ

В рамках Службы ПВЗ ИПА РАН (Гаязов, 2016) проводится ежедневная обработка ГНСС-наблюдений при помощи разработанного программного пакета. Используются два режима обработки. В первом режиме проводится обработка суточных серий GPS-наблюдений приблизительно 60–70 станций с задержкой около 8 ч, во втором обрабатываются наблюдения GPS и ГЛОНАСС от сети из 140–150 станций с 12-дневной задержкой.

В обоих вариантах определяются следующие параметры:

— ПВЗ (координаты полюса X_p , Y_p , их скорости \dot{X}_p , \dot{Y}_p , продолжительность суток LOD);

— вещественные фазовые неоднозначности;
— параметры движения спутников (начальные координаты, скорости и коэффициенты модели светового давления);
— поправки часов спутников и станций;
— межсистемные (GPS-ГЛОНАСС) задержки в приёмниках;
— зенитные тропосферные задержки;
— горизонтальные градиенты тропосферных задержек.

В режиме совместной обработки наблюдений ГЛОНАСС и GPS также вычисляются соответствующие частные производные и формируются матрицы нормальных уравнений для представления результатов в виде SINEX-файлов и их последующего комбинирования с получением координатных решений совместно с другими техниками космической геодезии.

Обработка суточной серии GPS-наблюдений на сервере с процессором Intel Core i7 3 ГГц занимает около 40 мин. Совместная обработка ГЛОНАСС и GPS наблюдений проводится на вычислительном сервере на основе двухпроцессорной системы с 14-ядерными процессорами Intel Xeon E5 с частотой 2.6 ГГц и занимает около 5 ч.

Основные результаты

Ряды ПВЗ

Основным продуктом обработки ГНСС-наблюдений являются ПВЗ. Полученные ряды ПВЗ представляются в Главный метрологический центр Государственной службы времени, частоты и определения параметров вращения Земли (ГМЦ ГСВЧ) и в IERS. На рис. 1 показаны осредненные по годам СКО полученных рядов координат полюса X_p (рис. 1а) и Y_p (рис. 1б) от комбинированного ряда C04 согласно данным ежемесячных бюллетеней В, выпускаемых в IERS (Explanatory supplement to IERS Bulletin A and Bulletin B). Аналогичные данные для длительности суток (LOD) представлены на рис. 2. Точность получаемых рядов находится на уровне точности результатов других центров анализа ГНСС-наблюдений.

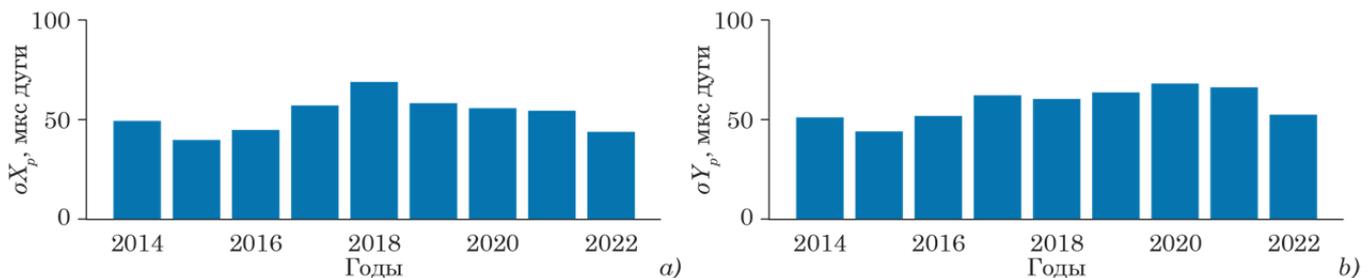


Рис. 1. Среднегодовые значения СКО полученных координат полюса X_p , Y_p от ряда C04 IERS по данным Бюллетеней В

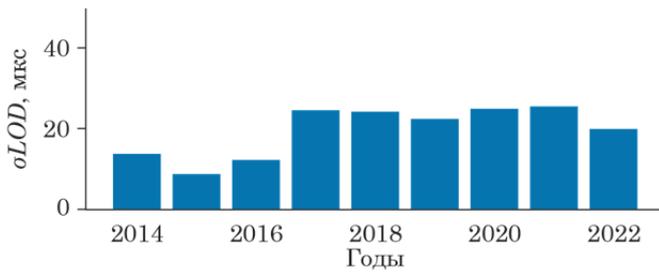


Рис. 2. Среднегодовые значения СКО длительности суток от ряда C04 IERS по данным Бюллетеней В

Спутниковые орбиты

Точность получаемых орбит спутников оценивается путем сравнения с комбинированными решениями IGS. На рис. 3 представлены суточные среднеквадратические разности по всем координатам (трехмерное СКО – 3D RMS) для всех обработанных спутников GPS и ГЛОНАСС за 2021 г.

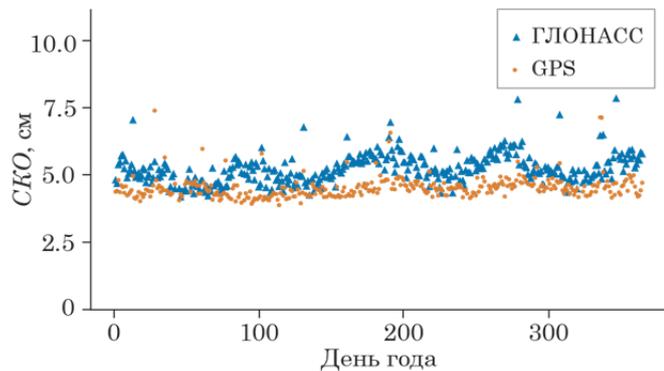


Рис. 3. Трехмерные СКО орбит по отношению к комбинированным данным IGS

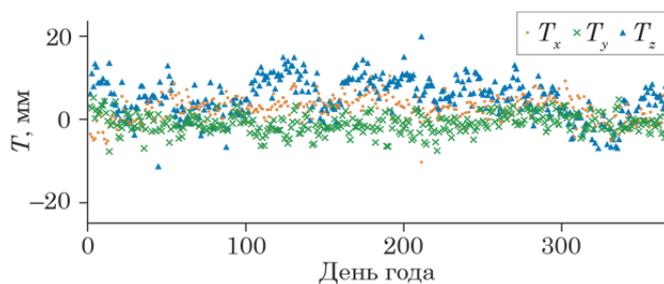


Рис. 4. Параметры сдвига T_x , T_y , T_z по полученным орбитам по отношению к орбитам IGS

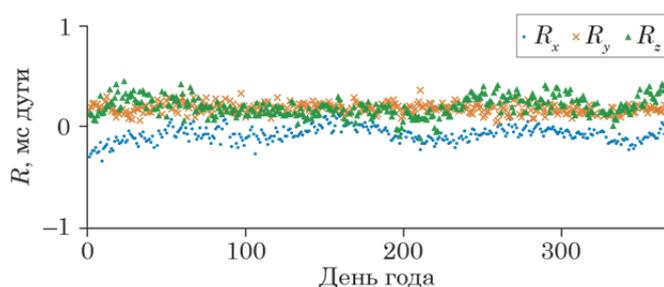


Рис. 5. Параметры поворота R_x , R_y , R_z

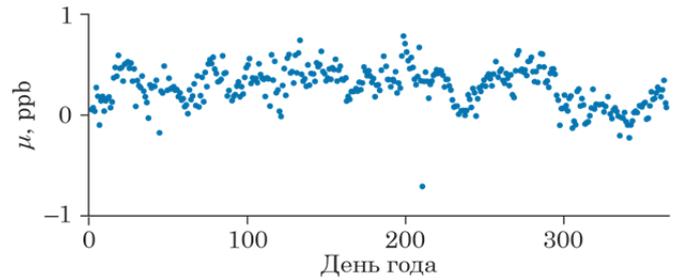


Рис. 6. Масштабный коэффициент μ (ppb = 10^{-9})

Рассматривая сетку вычисленных координат спутников как реализацию системы координат, на каждые сутки определяются параметры перехода между системами координат, полученными в решениях ИПА РАН и IGS. Вычисляются 7 параметров трансформации Гельмерта: сдвиги по осям T_j , повороты R_j и масштабный коэффициент μ :

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} + (1 + \mu \cdot 10^{-9}) \cdot \begin{bmatrix} 1 & -R_z & R_y \\ R_z & 1 & -R_x \\ -R_y & R_x & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix},$$

где x_i , y_i , z_i , ($i = 1, 2$) — координаты спутника в двух решениях.

Ряды значений T_j , R_j и μ для каждого суток 2021 г. приведены на рис. 4–6.

Таким образом, орбиты спутников хорошо согласованы с международными данными. Ухудшения точности орбит в отдельные дни связаны, как правило, с наличием одного или нескольких спутников, запущенных вновь или претерпевших коррекцию орбиты. Значения параметров перехода между реализуемыми динамическими системами координат в линейной мере находятся в пределах 2 см. Квазипериодические изменения в рядах параметров сдвига и систематические отклонения в масштабном коэффициенте свидетельствует о различиях в моделировании орбит, которые должны быть исследованы дополнительно.

Зенитная тропосферная задержка

При анализе тропосферной задержки основной интерес представляет влажная компонента. Полученные значения можно сравнивать не только с результатами других центров анализа ГНСС-наблюдений, но и с данными, полученными другими методами. Одним из таких методов, дающих наиболее высокую точность, является определение задержки из яркостной температуры атмосферы при помощи измерений радиометра водяного пара (РВП) (Ильин, 2015). На рис. 7 приведены разности полученных значений полной зенитной тропосферной задержки с соответствующими данными IGS для пункта международной ГНСС-сети SVTL (обсерватория «Светлое») за 2021 г., а на рис. 8 — разности влажной составляющей задержки с данными РВП, установленного рядом с ГНСС-антенной, для двухнедельного интервала (13 июля –

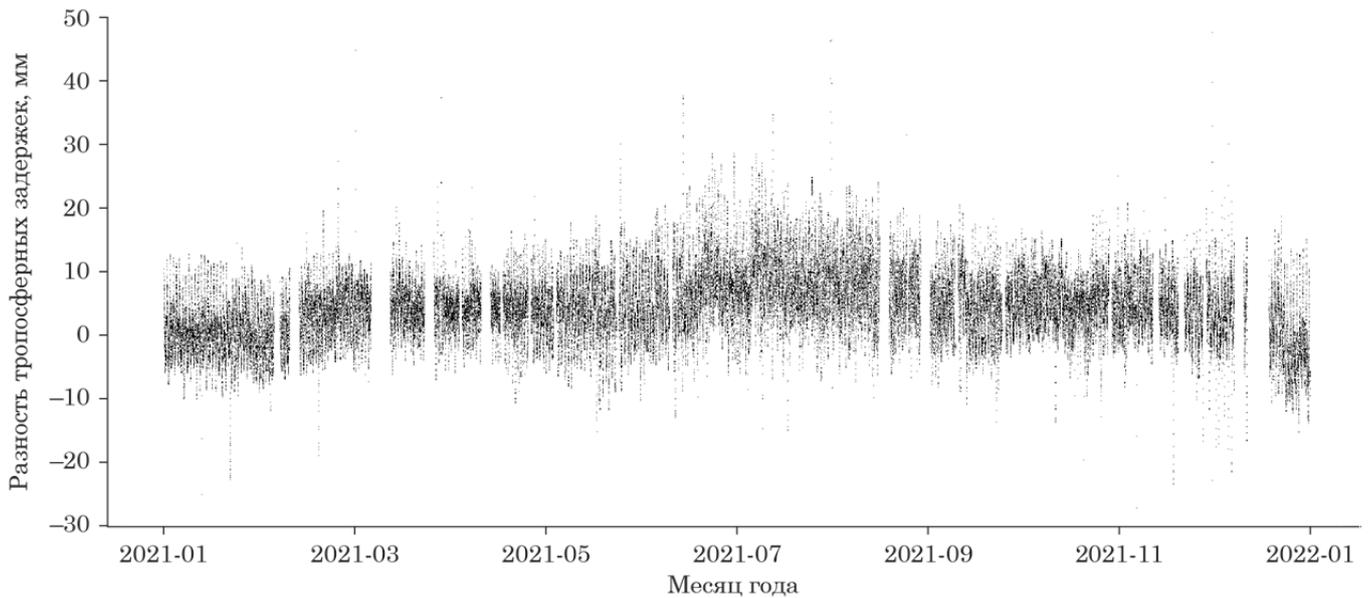


Рис. 7. Разности полной зенитной тропосферной задержки с данными IGS для станции SVTL

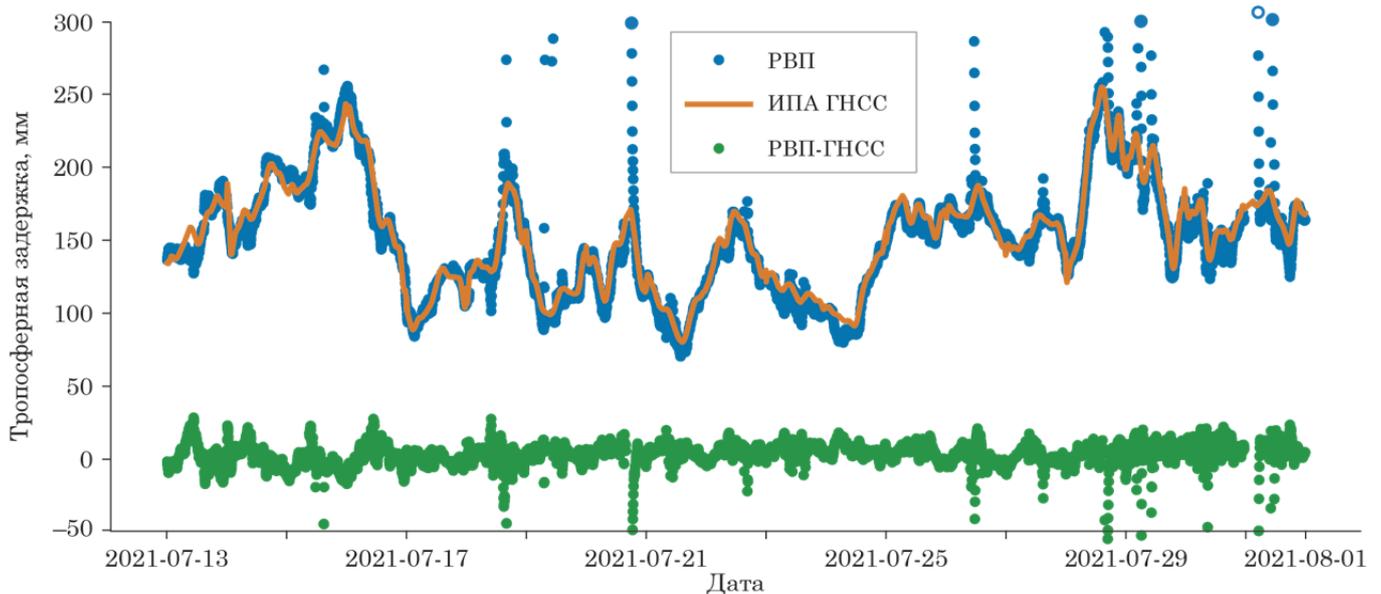


Рис. 8. Сравнение влажной зенитной тропосферной задержки (ZPD_w) по ГНСС и РВП

1 августа 2021 г.). Для того, чтобы сравнивать результаты обработки ГНСС-наблюдений, где определяется полная тропосферная задержка, с данными РВП, в которых содержится только влажная компонента, из полной задержки вычитаются значения сухой компоненты, которые вычисляются при помощи формулы Саастамойнена ([Saastamoinen, 1972](#)).

В обоих сравнениях наблюдается согласованность данных на субсантиметровом уровне. При сравнении с данными IGS наблюдается некоторое увеличение разброса и появление «горба» в летние месяцы. Значительные отклонения данных РВП в

отдельные дни связаны с наличием осадков, к которым чувствительны измерения РВП.

Поправки часов

Прямое сравнение полученных значений поправок часов станций и спутников с результатами других центров анализа затруднено из-за расхождений в подходах к реализации опорной шкалы времени. Поэтому более корректным является сравнение разностей поправок в виде «спутник — спутник» или «станция — станция», в которых исключается часть, зависящая от реализации опорной шкалы.

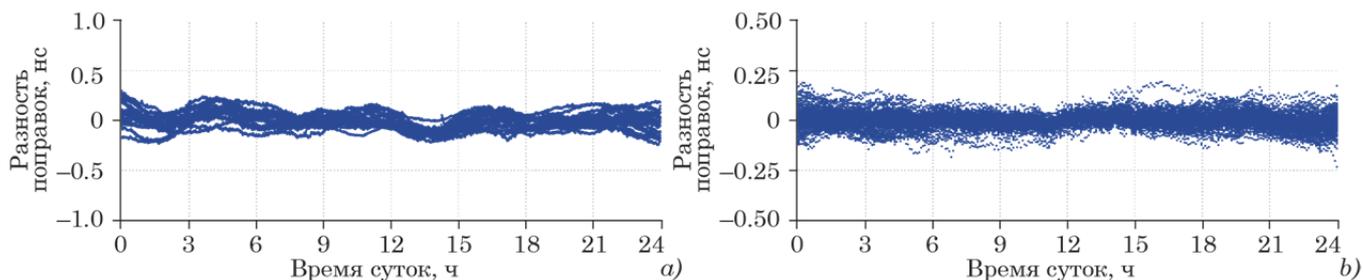


Рис. 9. Сравнение поправок часов для даты 08.08.2022 г. с данными IGS: а) разности поправок часов спутников по отношению к поправкам для спутника G01 и б) разности поправок часов станций по отношению к поправкам для станции BOR1

На рис. 9а приведены для одной даты разности поправок часов всех спутников GPS по отношению к поправкам часов спутника G01, условно принятого в качестве опорного. На рис. 9б представлены разности поправок часов всех станций, наблюдения которых вошли в обработку, по отношению к поправкам часов станции BOR1 (Боровице — одна из опорных станций Международного бюро мер и весов, поддерживающего шкалу Международного атомного времени). Сравнение проводилось для даты 08.08.2022 г. по финальным данным IGS (интервал 30 с — для спутников и 5 мин — для станций).

При таком сравнении разности (разностей поправок часов) не превышают 200 пс как для спутников, так и для станций. Квазипериодические смещения с амплитудами, достигающими до 150 пс при сравнении по спутникам, могут являться следствием неточного учёта аппаратных задержек, а также коррелированности фазовых неоднозначностей и поправок часов. Анализ этих отклонений будет продолжен в целях дальнейшего усовершенствования применяемых моделей и алгоритмов, а также для более точного согласования получаемых результатов обработки с результатами международных центров анализа.

Заключение

Новый программный пакет обработки ГНСС-наблюдений без формирования разностей фазовых и кодовых измерений был разработан с использованием современных астрономических и геофизических моделей. Гибкая схема параметризации позволяет использовать созданное программное обеспечение для высокоточного определения параметров вращения Земли, параметров орбит, поправок часов, тропосферных параметров, а также для решения других задач, связанных с использованием ГНСС-наблюдений. Реализованные в рамках пакета программные компоненты, предназначенные для учета различных факторов, могут также использоваться в других пакетах обработки наблюдений, полученных разными методами космической геодезии. Так компоненты для вычисления

вариаций геопотенциала были использованы в программе обработки лазерных локационных наблюдений Луны.

С использованием разработанного пакета в рамках работы службы ПВЗ ежедневно обрабатываются наблюдения GPS- и ГЛОНАСС-спутников, полученные на станциях глобальной сети. Сравнение результатов обработки с данными международных служб показывает высокую точность получаемых ПВЗ, орбит спутников, параметров тропосферы и поправок часов. В настоящее время ведётся работа по модернизации пакета, в том числе с целью повышения точности определения орбит. Планируется также совместная обработка наблюдений всех четырех глобальных навигационных систем, включая Galileo и Beidou.

Литература

- Гаязов И. С., Кешин М. О., Фоминов А. М. Программный пакет GRAPE и его использование для экспериментальных определений ПВЗ // Труды ИПА РАН. 2001. Вып. 6. С. 291–299.
- Гаязов И. С., Губанов В. С., Курдубов С. Л. и др. Служба параметров вращения Земли ИПА РАН // Труды ИПА РАН. 2016. Вып. 39. С. 23–29.
- Губанов В. С. Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. СПб.: Наука, 1997. 318 с.
- Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г. и др. Аппаратные средства мониторинга параметров атмосферы в обсерваториях РСДБ-комплекса Квазар-КВО // Труды ИПА РАН. 2015. Вып. 33. С. 52–57.
- Arnold D., Meindl M., Beutler G., et al. CODE's new solar radiation pressure model for GNSS orbit determination // Journal of Geodesy. 2015. Vol. 89. P. 775–791. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0814-4> (дата обращения: 12.09.2022).
- Blewitt G. Automatic editing algorithms for GPS data. Geophysical Research Letters. 1990. Vol. 17(3). P. 199–202.
- Boehm J.; Niell A.; Tregoning P., Schuh H. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data // Geophysical Research Letters. 2006. Vol. 33. L01603.
- Explanatory supplement to IERS Bulletin A and Bulletin B/C04 [Электронный ресурс]. URL: ftp://hpiers.obspm.fr/iers/bul/bulb_new/bulletinb.pdf (дата обращения: 12.09.2022).

Herring T. A. Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data, in Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy // Netherlands Geod. Commis. / ed. by J. C. de Munck, and T. A. Th. Spoelstra. 1992. Ser. 36. P. 157–164.

IERS Conventions 2010 (IERS Technical Note 36). Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, 2010. Ch. 5.

IGS Reference Frames [Электронный ресурс]. URL: <http://acc.igs.org/igs-frames.html> (дата обращения: 12.09.2022).

Pitjeva E., Pavlov D. Ephemerides EPM2017 and EPM2017H. [Электронный ресурс]. URL: <http://iaaras.ru/en/dept/ephemeris/epm/2017> (дата обращения: 12.09.2022).

Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging of satellites, // The Use of Artificial Satellites for Geodesy, Geophysical Monograph Series /ed. by Henriksen S. W., Mancini A., Chovitz B. H. 1972. Vol. 15. P. 247–251.

Wu J., Wu S., Hajj G., et al. Effects of antenna orientation on GPS carrier phase measurements // Manuscripta Geodaetica. 1993. Vol. 18. P. 91–98.