

УДК 519.65, 629.783

Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-288-300

Для цитирования: Аномалии эфемеридных и временных продуктов IGS и их влияние на решение навигационных задач / А. С. Пустошилов, С. П. Царев, Ю. Ю. Ушаков, Е. В. Овчинникова // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 2. С. 288–300. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-288-300.

For citation: Pustoshilov A. S., Tsarev S. P., Ushakov Yu. Yu., Ovchinnikova E. V. Anomalies in IGS ephemeris and clock products and their impact on the solution of navigation problems. *Siberian Aerospace Journal*. 2021, Vol. 22, No. 2, P. 288–300. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-2-288-300.

Аномалии эфемеридных и временных продуктов IGS и их влияние на решение навигационных задач*

А. С. Пустошилов^{1**}, С. П. Царев¹, Ю. Ю. Ушаков¹, Е. В. Овчинникова²

¹Сибирский федеральный университет

Российская Федерация, 660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79

²Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева

Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31

**E-mail: alphasoft@inbox.ru

Предметом исследования в данной работе являются аномалии в финальных продуктах Международной службы ГНСС (IGS), а именно в орбитах и уходах часов навигационных спутников (НКА). Цель исследования: определить влияние таких аномалий на точность решения задачи высокоточного позиционирования (PPP). В качестве метода для обнаружения и различения аномалий в орбитах навигационных спутников используется описанный ранее авторами метод аппроксимации полиномами высоких степеней. При решении задачи PPP используется методология, рекомендованная IGS. Предложенный метод обнаружения и различения аномалий в орбитах применен к анализу аномалий в орбитах навигационных спутников GPS. Продемонстрированы примеры аномалий, которые можно обнаружить, используя предложенный метод. Приводится краткий статистический анализ и сравнение частот появления аномалий в орбитах навигационных спутников GPS с 2010 по 2018 гг., опубликованные различными аналитическими центрами IGS. Показывается, что аномалии в орбитах, встречающиеся на стыках суточных интервалов, как правило, коррелированы с аномалиями в уходах часов и имеют частично взаимно компенсирующий эффект на решение навигационных задач. Эксперименты показали, что при решении задачи PPP аномалии существенно увеличивают среднеквадратичное отклонение (СКО) невязки решения. Рассмотрены два варианта решения проблемы с аномальными орбитами: исключение из решения спутников с аномальными стыками суточных интервалов и «исправление» аномалии в орбите. Опробована наиболее естественная методика исправления орбит (изменения орбиты с целью удаления больших аномалий) на стыках суточных отрезков публикуемых финальных орбит. Наиболее эффективным с точки зрения задач PPP оказалось исключение спутников с аномалиями в орбите, так как попытки «исправить» орбиту чаще приводили не к уменьшению СКО невязок псевдодальностей, а к его увеличению, что связано с коррелированными аномалиями в уходе часов навигационного спутника. По результатам исследования можно сделать вывод: перед решением задач PPP необходимо исследовать

* Работа поддержана Красноярским математическим центром, финансируемым Минобрнауки РФ в рамках мероприятий по созданию и развитию региональных НОМЦ (Соглашение 075-02-2020-1534/1).

This work is supported by the Krasnoyarsk Mathematical Center and financed by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in the framework of the establishment and development of regional Centers for Mathematics Research and Education (Agreement No. 075-02-2020-1534/1).

предложенными методами орбиты и уходы часов навигационных спутников на присутствие в них аномалий и по возможности исключать такие спутники из данных для решения задачи PPP. Предлагаемые нами методы обнаружения и учета аномалий орбит и часов навигационных спутников, кроме очевидных приложений к решению наземных навигационных задач, применимы и для мониторинга качества работы космического и наземного сегментов систем ГЛОНАСС и GPS.

Ключевые слова: IGS, GPS, орбиты спутников, часы спутников, PPP.

Anomalies in IGS ephemeris and clock products and their impact on the solution of navigation problems

A. S. Pustoshilov^{1**}, S. P. Tsarev¹, Yu. Yu. Ushakov¹, E. V. Ovchinnikova²

¹Siberian Federal University

79, Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology

31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation

**E-mail: alphasoft@inbox.ru

The subject of this work is anomalies in the final products of the International GNSS Service (IGS), namely in the orbits and clock shifts of navigation satellites. The aim of the study was to determine the effect of such anomalies on the accuracy of precise point positioning (PPP) problems. As a method for detecting and distinguishing anomalies in the orbits of navigation satellites, the method proposed earlier by the authors (approximation by polynomials of high degrees) is used. For PPP problems we used the solution methodology recommended by IGS. The proposed method for detection of anomalies in orbits is applied to the analysis of anomalies in the orbits of GPS navigation satellites. Examples of anomalies that can be detected using the proposed method are demonstrated. A brief statistical analysis and comparison of the frequencies of anomalies in the orbits of GPS navigation satellites from 2010 to 2018, published by various IGS analytical centers, are presented. It is shown that orbital anomalies at the boundaries of daily intervals are, as a rule, correlated with anomalies in clock shifts and have a partially mutually compensating effect on the solution of navigation problems. Experiments have shown that for PPP problems, anomalies significantly increase the standard deviation of the pseudorange residues of the solution. Two options for mitigating the problem with anomalous orbits are considered: exclusion of satellites with anomalies at the boundaries of daily intervals from the solution process and “correction” of the anomaly in the orbit. The most natural method of orbit correction (an orbit change to remove large anomalies at the day boundaries) of the published final orbits has been tested. From the point of view of PPP problems the most effective way to mitigate the exposed problems at the day boundaries turned out to be the exclusion of satellites with anomalies in the orbit, since attempts to “correct” the orbits more often led to an increase in the RMS deviation of pseudo-ranges, which is associated with correlated anomalies in the clocks of the navigation satellite. According to the results of the study, we can conclude: before solving the PPP problems, it is necessary to investigate the orbits and clocks of the navigation satellites for the presence of anomalies by the proposed methods and, if possible, exclude such satellites from the input data before solving the PPP problem. The proposed methods for detection of anomalies in the published orbits and clocks of navigation satellites, in addition to obvious applications to PPP problems, are also applicable to monitoring the quality of functioning of the space and ground segments of GLONASS and GPS systems.

Keywords: IGS, GPS, satellite orbits, satellite clocks, PPP.

Введение

Задача высокоточного позиционирования (precise point positioning, PPP) имеет большое значение в геодезии и является одним из способов использования глобальных спутниковых навигационных систем (ГНСС). Для решения такой задачи используются фазовые и кодовые измерения с навигационного приемника, а также уточненная информация об орбитах и часах навигационных спутников. В качестве источника информации об уточненных (финальных) орбитах и часах (частотно-временных поправках к шкале времени спутника) выступают аналитические центры Международной службы ГНСС (IGS) [1]: ИАЦ ГЛОНАСС [2], CODE [3], ESA [4] и др. Информация об орбитах передается в формате SP3 на каждый суточный интервал времени в виде временных рядов данных с шагом по времени 15 мин [5], информация о часах спутника передается в формате CLK с шагом по времени 30 с или 5 мин [6]. Используемый нами метод обнаружения аномалий в орбитах ранее был подробно описан в работах [7; 8] и позволяет обнаруживать малые (сантиметровые) аномалии в орбитах навигационных спутников. Также в работе [7] отмечается, что на стыках суточных интервалов в орбитах часто присутствуют разрывы («скачки»). Обнаружение аномалий в уходах часов не представляет труда: достаточно удалить линейные и квадратичные (для больших временных интервалов) тренды методом наименьших квадратов (МНК).

Нами были предприняты попытки «исправить» обнаруженные аномалии орбит, т. е. скорректировать орбиту так, чтобы новая орбита не имела бы разрыва на стыке суток и была близка к опубликованным финальным орбитам. Однако такая коррекция не всегда приводила к повышению точности позиционирования либо ее ухудшала. Это связано с наличием подобных аномалий и во временной информации (уход часов НКА).

Метод обнаружения аномалий орбит

Методика поиска аномалий в SP3-данных (стандартный текстовый формат для эфемеридных продуктов IGS, доступны суточными интервалами с шагом 15 мин по времени) состоит в поиске разрывов орбиты (скачков временного ряда) на стыке двух суточных интервалов путем аппроксимации каждой из координат спутника для этого двухсуточного интервала полиномом высокой степени. Далее вычисляется невязка аппроксимации. Как показано в [7; 8], по полученной невязке легко определить тип аномалии («скачок» или «выброс», а также маневр спутника или период вхождения в тень). Применявшийся нами метод аппроксимации основан на использовании предвычисляемого набора дискретных ортогональных полиномов Чебышева–Хана [8]. Такие полиномы рассчитываются в метках времени анализируемого ряда до выбранной степени r (в нашем случае $r = 100$), после чего легко вычисляется полином наилучшего среднеквадратичного приближения. Основная проблема состоит в вычислении полиномов Чебышева–Хана. Стандартные формулы теории ортогональных дискретных полиномов непригодны в силу накопления большой ошибки для высоких степеней и при большом количестве точек (в нашем случае 192 точки). Устойчивые алгоритмы вычисления полиномов Чебышева–Хана описаны в [8]. В данной работе мы использовали программный комплекс [9], адаптированный к задаче аппроксимации орбит. Метод полиномиальной аппроксимации существенно проще рассматривавшегося ранее в [10; 11] подхода, предусматривавшего высокоточное моделирование движения НКА с помощью решения уравнений движения с использованием множества дополнительных данных.

Для решаемых нами задач точного позиционирования важна аномалия орбиты не по каждой отдельной координате, а величина ее проекции на ось визирования между спутником и приемником. Для упрощения анализа в качестве координат приемника использовался центр масс Земли, т. е. вычислялась величина аномалии вдоль радиус-вектора НКА – центр Земли.

Аномалии, обнаруженные в финальных орбитах IGS

Вопрос аномалий в орбитах навигационных спутников обсуждается в работах [7; 8; 10; 11]. В работе [7] показаны обнаруженные аномалии в орбитах спутников ГЛОНАСС; такие же аномалии наблюдаются и в орбитах спутников GPS. Примеры обнаруженных «скачков» в финальных орбитах спутников G03 и G08 на стыке суток (точнее, их воздействие на невязки аппроксимации) по данным аналитического центра ИАЦ КВНО, показаны на рис. 1 и 2.

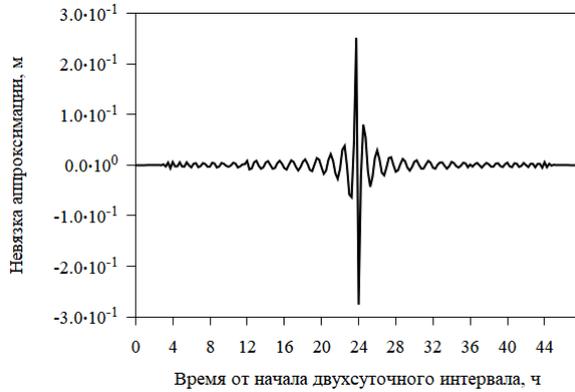


Рис. 1. Невязка аппроксимации полиномом степени 100 координаты Y спутника G03 на стыке суток 21–22 ноября 2014 г. ИАЦ КВНО

Fig. 1. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the Y coordinate of the G03 satellite at the day boundary 21–22 November 2014 by the IAC PNT

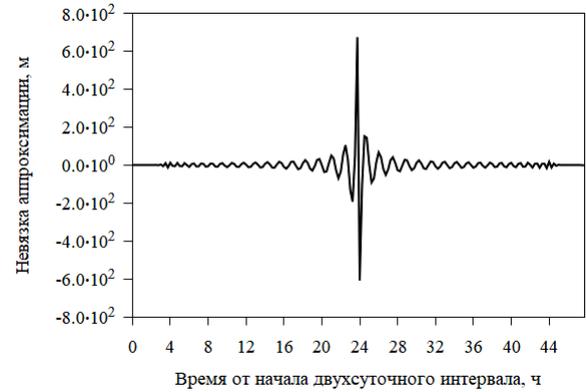


Рис. 2. Невязка аппроксимации полиномом степени 100 координаты Y спутника G08 на стыке суток 5–6 апреля 2018 г. ИАЦ КВНО

Fig. 2. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the Y coordinate of the G08 satellite at the day boundary 5–6 April 2018 by the IAC PNT

Согласно рекомендациям, приведенным в работе [7], определим величину «скачка» на каждом из стыков суток. Для невязки аппроксимации, изображенной на рис. 1, величина «скачка» составляет около 70 см, для невязки аппроксимации на рис. 2 величина «скачка» составляет около 1,8 км. Большие «скачки» в финальных орбитах аналитических центров встречаются не очень часто (в среднем 1 «скачок» в год для каждого спутника), тогда как маленькие «скачки» встречаются часто.

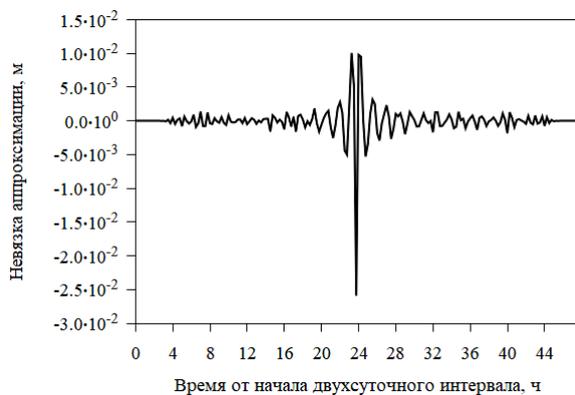


Рис. 3. Невязка аппроксимации полиномом степени 100 координаты Y спутника G04 на стыке суток («выброс») 22–23 мая 2016 г. ИАЦ КВНО

Fig. 3. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the Y coordinate of the G04 satellite at the day boundary 22–23 May 2016 by the IAC PNT

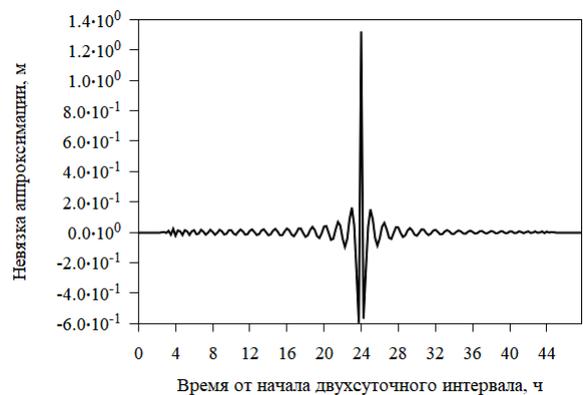


Рис. 4. Невязка аппроксимации полиномом степени 100 координаты Y спутника G01 на стыке суток («выброс») 7–8 ноября 2016 г. ИАЦ КВНО

Fig. 4. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the Y coordinate of the G01 satellite at the day boundary 7–8 November 2016 by the IAC PNT

Помимо «скачков», в финальных орбитах спутников GPS наблюдались и «выбросы». На рис. 3 и 4 показаны «выбросы» в финальных орбитах спутников GPS G01 и G04 соответственно (точнее, как и ранее для «скачков», воздействие «выбросов» на невязки аппроксимации).

Величина «выброса» в орбите спутника G04 (рис. 3), определенного по невязке аппроксимации, составляет приблизительно 3,5 см. В орбите спутника G01 (рис. 4) величина «выброса» составляет примерно 1,8 м.

Следующей аномалией, которую позволяет обнаружить данная методика – поведение финальной орбиты навигационного спутника при выполнении маневра. Подтвердить присутствие маневра у спутника GPS возможно, используя сообщения NANU (Notice Advisory to Navstar Users) [12; 13]. Спутник G15, согласно сообщениям NANU, выполнял один из маневров 20 августа 2013 г. Рассмотрим невязку аппроксимации координаты X полиномом 100 степени финальной орбиты данного спутника за 20–21 августа 2013 г. (рис. 5).

Согласно данным NANU, маневр спутника начался в 13:01 GPS Time и закончился в 19:42 GPS Time. Из временной диаграммы невязки на рис. 3 видно, что на середину этого участка приходится пик в невязке аппроксимации орбиты спутника. Отметим отличие в форме (растянутость по временной оси) аномалий невязок для рис. 3–5.

По невязкам результатов аппроксимации можно определить участки вхождения в тень, временная диаграмма невязки для такой ситуации представлена на рис. 6. Для подтверждения вхождения в тень был определен угол СОЗ (Солнце – Объект – Земля), который соответствовал на данном временном интервале присутствию теневых участков орбиты.

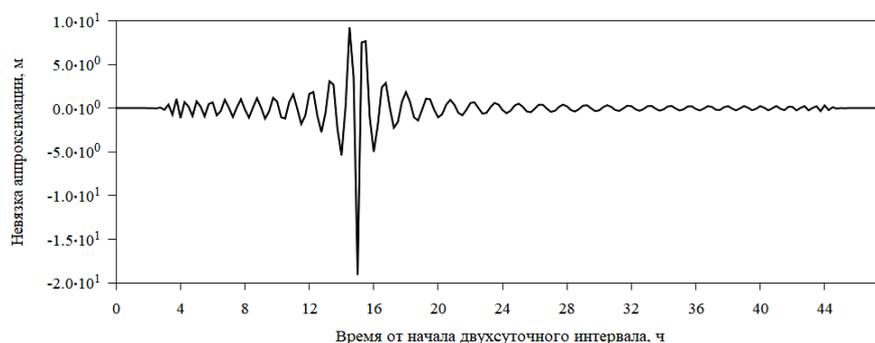


Рис. 5. Невязка аппроксимации полиномом степени 100 «маневра» координата X спутника G15 на стыке суток 20–21 августа 2013 г. ИАЦ КВНО

Fig. 5. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the X coordinate of the G15 satellite at the day boundary 20–21 August 2013 by the IAC PNT

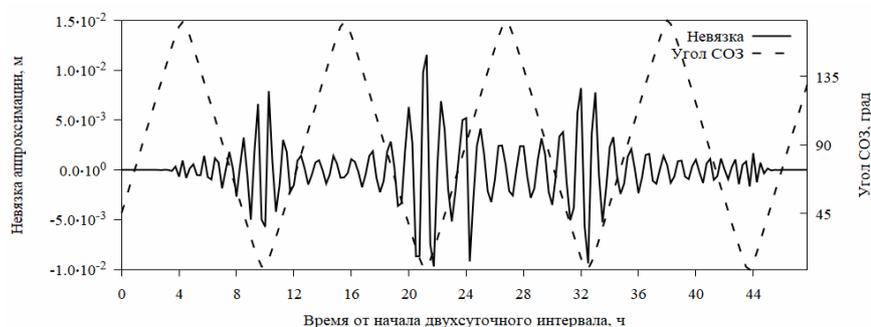


Рис. 6. Временные диаграммы невязки аппроксимации для спутника R03 для временного интервала 30–31 мая 2013 г.

Fig. 6. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the X coordinate of the R03 satellite at the day boundary 30–31 May 2013 by the IAC PNT and angle SOE

В дальнейшем при накоплении статистики аномалий у различных аналитических центров мы будем рассматривать максимум модуля невязки (для каждого спутника берется максимальное значение из трех координат).

Статистика аномалий в финальных орбитах GPS

В работе [7] приведена статистика аномалий в финальных орбитах различных аналитических центров для спутников ГЛОНАСС. В данном разделе показана статистика аномалий для спутников GPS с 2010 по 2018 гг.

Разделим найденные максимумы модуля невязки (по всем трем координатам) на 2 группы: менее 10 и более 10 см.

Для группы, где величина менее 10 см, построим двумерное распределение, где в качестве одного из измерений выбираем спутник, к которому относится максимум модуля невязки на каждом двухсуточном интервале (начало интервала берется в начале каждого суток), в качестве второго – величину этого максимума модуля невязки с шагом 1 см. Накопление количества аномалий выполняется на всем временном интервале (с 2010 по 2018 г.), по каждому аналитическому центру графики строятся отдельно. Двумерные гистограммы для каждого аналитического центра представлены: на рис. 7 для CODE, на рис. 8 для ESA, на рис. 9 для ИАЦ КВНО, на рис. 10 для IGS. Справа от гистограммы показана легенда количества аномалий с 2010 по 2018 гг.

Для группы менее 10 см можно отметить, что финальные орбиты различных аналитических центров имеют различное количество аномалий, превышающих 1 см. Аналитический центр CODE имеет не более 120 аномалий на 1 спутник в диапазоне от 1 до 2 см. Аналитический центр ESA имеет в среднем от 1500 до 1800 аномалий в диапазоне от 1 до 2 см на каждый спутник. Аналитический центр ИАЦ КВНО имеет в среднем от 1000 до 1400 аномалий в диапазоне от 1 до 2 см на каждый спутник. Аналитический центр IGS имеет в среднем от 400 до 900 аномалий в диапазоне от 1 до 2 см на каждый спутник. При этом можно увидеть взаимосвязь в количестве аномалий на спутник между аналитическими центрами CODE и IGS.

Ситуаций, когда максимум модуля невязки превышает порог в 10 см, значительно меньше, для таких ситуаций также построим двумерное распределение. В качестве одного из измерений выбираем спутник, а в качестве второго – начало годового интервала (с шагом 1 год). За каждый год накапливается число аномалий с максимумом модуля невязки более 10 см на всех двухсуточных интервалах аппроксимации, по каждому аналитическому центру отдельно. Полученные распределения показаны на рис. 11 для CODE, 12 – ESA, 13 – ИАЦ КВНО, 14 – IGS. Справа от гистограммы показана легенда количества событий.

Наиболее значимые аномалии, имеющие массовый характер (почти для всех НКА), наблюдались у аналитического центра ИАЦ КВНО в 2014 и 2016 гг. Для разных аналитических центров можно отметить, что наблюдались годы, когда для определенных спутников достигалось максимальное для данного центра количество аномалий в год. При этом такие ситуации не всегда взаимосвязаны у различных центров. Это частично объясняется, в том числе, и пропусками в публикуемых каждым центром SP3-данных (когда центр не выкладывал недостоверные с его точки зрения орбиты): сутки с большими аномалиями для одного центра могли быть просто выброшены другим центром и не присутствуют тем самым в статистике на рис. 11–14. Доступность (наличие на серверах IGS) SP3-данных для аналитического центра CODE составляет 97 %, ESA – 90 %, ИАЦ КВНО – 93 %, IGS – 95 %. В среднем по всем аналитическим центрам максимальное число аномалий, превышающих 10 см, не более 20.

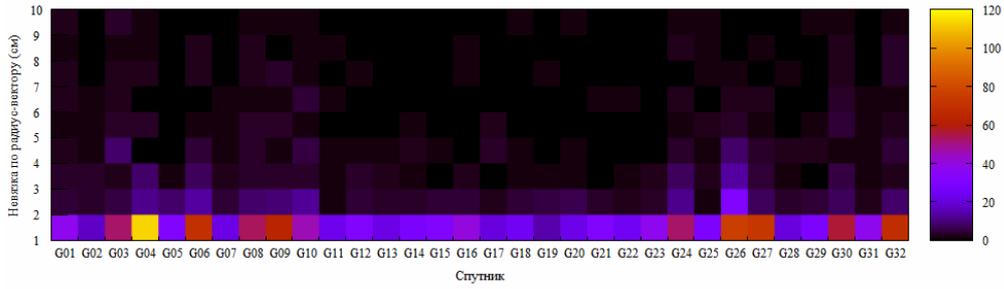


Рис. 7. Распределение количества аномалий менее 10 см за интервал наблюдения с 2010 по 2018 гг. для аналитического центра CODE

Fig. 7. Distribution of the number of anomalies less than 10 cm over the observation interval from 2010 to 2018 for the CODE analytical center

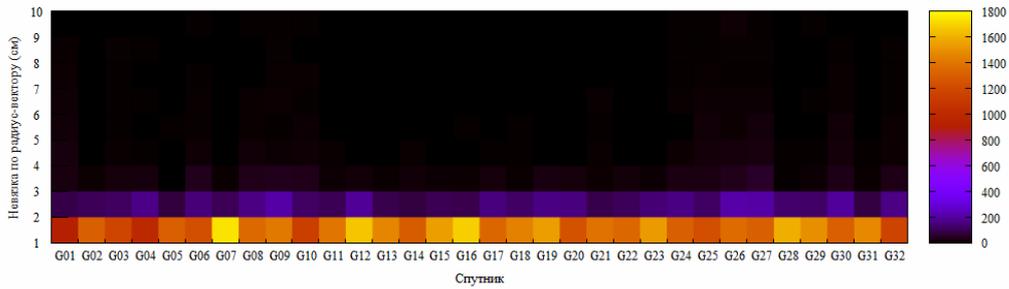


Рис. 8. Распределение количества аномалии менее 10 см за интервал наблюдения с 2010 по 2018 гг. для аналитического центра ESA

Fig. 8. Distribution of the number of anomalies less than 10 cm over the observation interval from 2010 to 2018 for the ESA analytical center

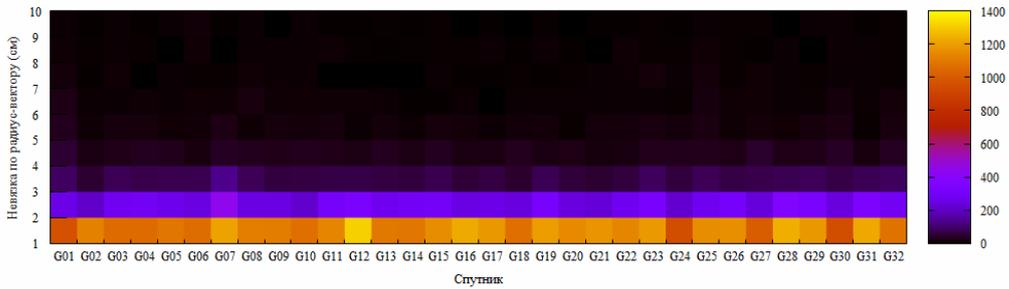


Рис. 9. Распределение количества аномалии менее 10 см за интервал наблюдения с 2010 по 2018 гг. для аналитического центра ИАЦ

Fig. 9. Distribution of the number of anomalies less than 10 cm over the observation interval from 2010 to 2018 for the analytical center of the IAC KVNO

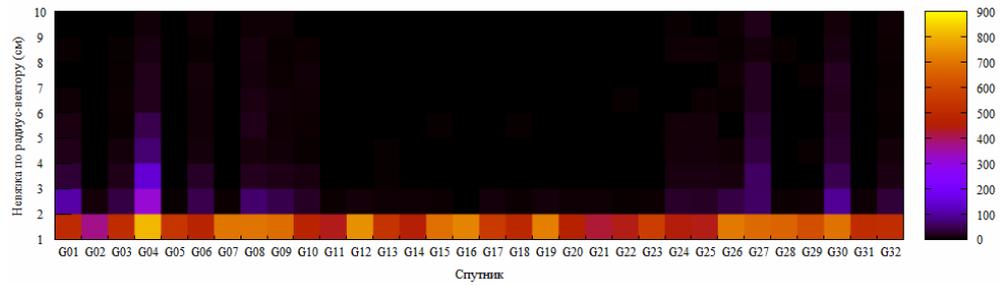


Рис. 10. Распределение количества аномалии менее 10 см за интервал наблюдения с 2010 по 2018 гг. для аналитического центра IGS

Fig. 10. Distribution of the number of anomalies less than 10 cm over the observation interval from 2010 to 2018 for the IGS analytical center

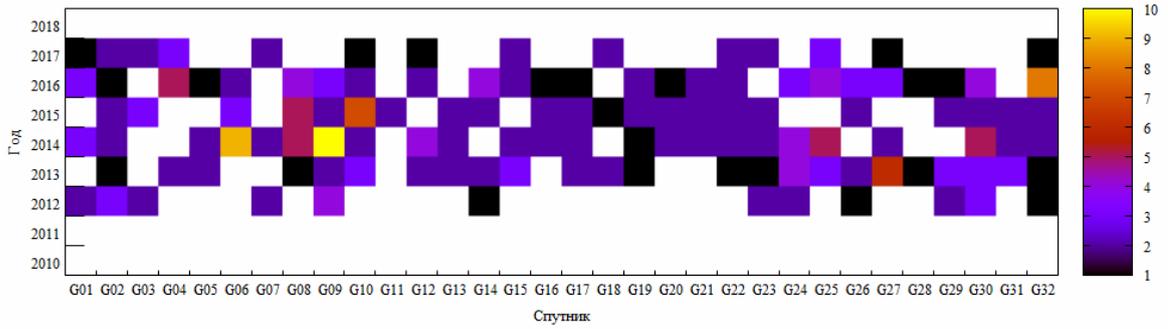


Рис. 11. Распределение аномалий более 10 см по годам для аналитического центра CODE

Fig. 11. Distribution of anomalies over 10 cm by year for the CODE analytical center

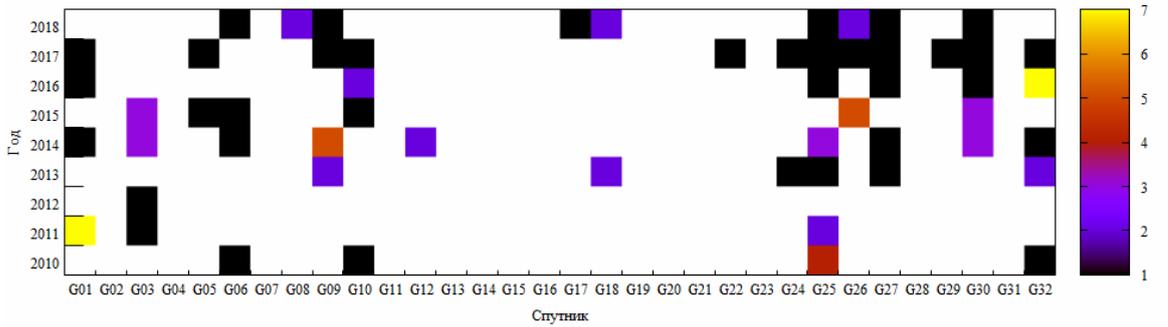


Рис. 12. Распределение аномалий более 10 см по годам для аналитического центра ESA

Fig. 12. Distribution of anomalies over 10 cm by year for the ESA analytical center

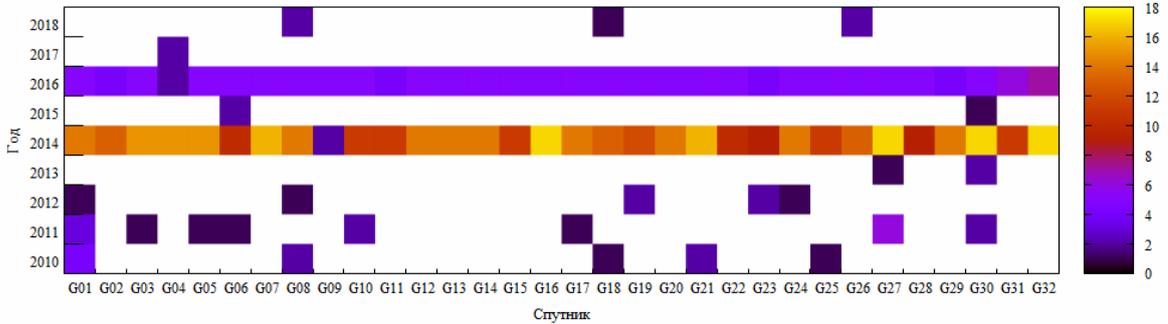


Рис. 13. Распределение аномалий более 10 см по годам для аналитического центра ИАЦ

Fig. 13. Distribution of anomalies over 10 cm by years for the analytical center IAC KVNO

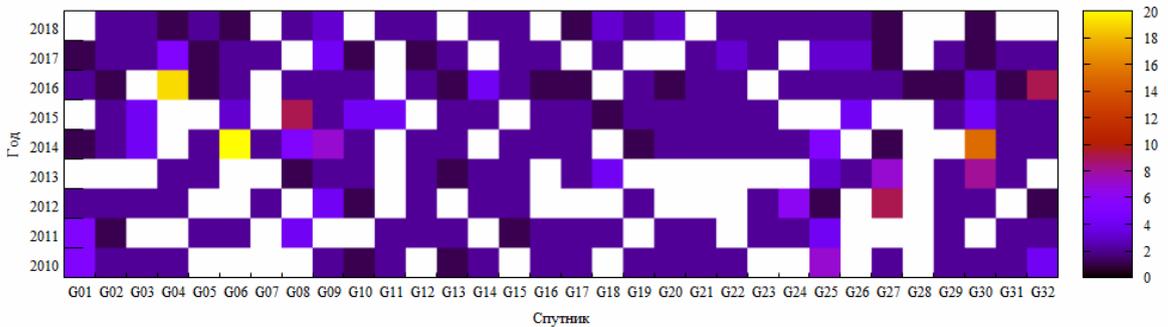


Рис. 14. Распределение аномалий более 10 см по годам для аналитического центра IGS

Fig. 14. Distribution of anomalies over 10 cm by year for the IGS analytical center

Был выполнен анализ положения максимума модуля невязки в окне аппроксимации. Чаще всего максимум приходился на стык суточных интервалов, однако наблюдались ситуации у спутников GPS, когда аномалия приходилась не на стык суточных интервалов, что почти всегда было связано с маневрами спутников GPS.

Как видно из гистограмм, у всех аналитических центров встречаются как большие (более 10 см), так и малые (менее 10 см) аномалии в финальных орбитах, которые тем не менее предлагается использовать в задачах высокоточного позиционирования.

Аномалии, обнаруживаемые в уходах часов спутников GPS

Для двухсуточных интервалов на стыках суток, для которых наблюдались аномалии по максимуму модуля невязки, превышающие несколько см (для разных аналитических центров выбирались различные минимальные отклонения), были исследованы уходы часов с удалением линейного (и квадратичного для больших интервалов времени) тренда.

За период с 2010 по 2018 гг. была накоплена статистика разрывов, величина которых по радиус-вектору превышала 5 см. Для спутников GPS в данных аналитического центра CODE таких ситуаций было 42. В данных аналитического центра IGS их было 275, при этом исключались ситуации, когда разрыв превышал по радиус-вектору 10 м. На стыках суток с разрывом в орбите выполнялась аппроксимация уходов часов спутника линейной функцией и вычислялась невязка аппроксимации. Далее проводился совместный анализ невязок аппроксимации орбиты и ухода часов данного НКА. Как оказалось, при решении задачи PPP эти невязки (разрывы данных), как правило, взаимно компенсируются. Типичный пример компенсации разрывов на стыке суток в орбите и уходе часов приведен на рис. 15, 16.

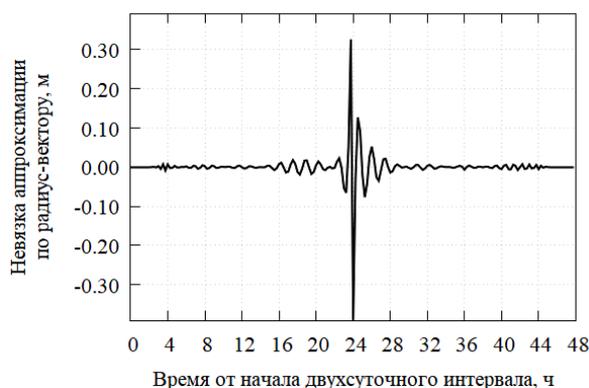


Рис. 15. Невязка аппроксимации расстояния по радиус-вектору полиномом степени 100 орбиты спутника G30 на стыке суток 30 ноября – 1 декабря 2015 г., центр CODE

Fig. 15. Residual of approximation by a polynomial of degree 100 of the radius-vector orbit of the G30 satellite at the day boundary 30 November 2010 – 01 December 2010 by the CODE

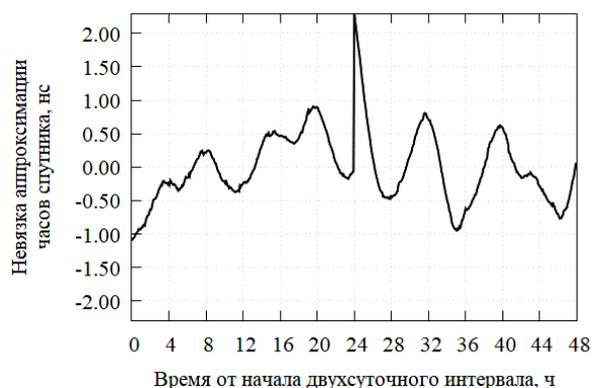


Рис. 16. Невязка аппроксимации ухода часов спутника G30 полиномом степени 1 на стыке суток 30 ноября – 1 декабря 2015 г., центр CODE

Fig. 16. Residual of approximation by a polynomial of degree 1 of the G30 satellite clock at the day boundary 30 November 2010 – 01 December 2010 by the CODE

На рис. 13 разрыв в орбите по радиус-вектору составляет около 60 см, он частично компенсируется при решении задач PPP разрывом в часах (приблизительно 2 нс).

Влияние аномалий в продуктах IGS на решение задачи PPP

Задача высокоточного позиционирования (PPP) заключается в нахождении с сантиметровой точностью координат станции и её ухода часов по прямым измерениям фазы и псевдодально-

сти по сигналам НКА. Для решения этой задачи необходимо использовать высокоточные эфемериды и апостериорные оценки ухода часов НКА, которые мы берём из финальных SP3- и RINEX Clock-файлов службы IGS, а также других обрабатывающих центров. Кроме того, согласно [14], для достижения адекватной точности необходим учёт следующих эффектов:

- релятивистская поправка часов [15];
- задержка сигнала в тропосфере (при выполнении данной работы используется модель из [15], формула (9.12), при этом параметры D_{hz} , D_{wz} , G_N , G_E моделируются с помощью кусочно-линейной функции, значения функций в узлах оцениваются вместе с координатами и уходом часов станции);
- смещение фазового центра антенн НКА и станций, а также вариация фазового центра в зависимости от угла, под которым передаётся и принимается сигнал по отношению к надиру и зениту, соответственно (эти поправки передаются в файлах ANTEX службой IGS);
- поправка на вращения фазы сигнала при повороте НКА относительно приемника;
- смещение наземного измерительного пункта за счёт деформаций земной коры, вызванных приливами в твёрдом теле Земли, неравномерностью вращения Земли, а также давлением океанической воды, перемещающейся под действием приливных сил Луны и Солнца [15].

Исходными данными в задаче PPP становятся измерения псевдодалности и фазы по сигналам НКА. Оцениваемыми параметрами являются координаты станции, уход часов приёмника, параметры модели задержки сигнала в тропосфере и фазовая неоднозначность. Модель измерительных данных представляет собой систему условных уравнений, связывающих измеренные и оцениваемые величины. Система решается путём линеаризации по уточняемым параметрам, линейная система решается методом наименьших квадратов.

В работе использовались измерительные данные со станций IGS [1]: KOKV, MGUE, MAD2, HRAO. Для таких станций выбирались дни, когда спутник с аномалией в орбите находился в зоне радиовидимости станции на стыке суток (аномалии определялись полиномиальной аппроксимацией). Было проведено 2 серии экспериментов, в которых оценивались такие параметры, как невязка псевдодалности между измеренной безионосферной комбинацией и смоделированной в задаче PPP, а также координаты станции наблюдения.

В первой серии экспериментов задача PPP решалась на двухсуточных интервалах с аномалией в орбите какого-либо спутника на стыке этих интервалов. В экспериментах прежде всего оценивалось влияние аномалии в орбите спутника на невязки между измеренной безионосферной фазовой псевдодалностью и ее модельным значением. В невязках наблюдались аномальные «скачки», как у спутника с аномалией в орбите, так и у других спутников. На следующем этапе данной серии экспериментов мы исключили из решения задачи PPP спутники с аномалией в орбите. После чего снова проанализировали невязки псевдодалности. В результате аномалии в псевдодалностях вблизи стыка суток уменьшили свою величину или полностью исчезли. На третьем этапе данной серии экспериментов, вместо исключения спутника с аномалией в орбите, мы пытались «исправить» эту аномалию, формируя новую орбиту, используя модель движения спутника, описанную в IERS Conventions [15], согласуя ее с опубликованными финальными орбитами на двухсуточном интервале. Анализ невязок псевдодалности показал, что подобным образом исправленные орбиты не только не уменьшают величину «скачка» или «выброса» невязок, но зачастую приводят к их увеличению. Такая ситуация является следствием того, что в уходах часов спутника тоже присутствуют аномалии, при этом данные аномалии часто компенсируют аномалии в орбитах, поэтому подход, связанный с исправлением только аномалий в орбитах, не может быть применен.

Вторая серия экспериментов была посвящена оценке качества решения задачи PPP на относительно небольшом интервале, который расположен на стыке суток с аномалией. В экспери-

ментах рассматривался интервал в 2 часа до и после стыка суток (рис. 17), на котором решалась задача PPP.

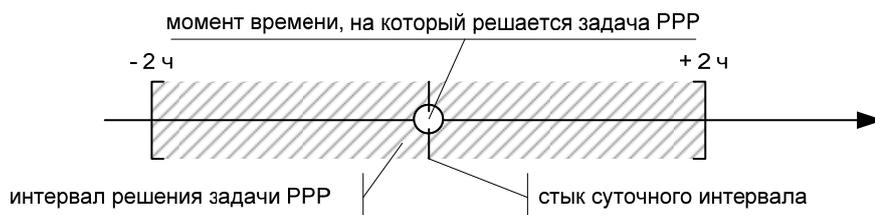


Рис. 17. Временная диаграмма решения задачи PPP во второй серии экспериментов

Fig. 17. Timing diagram of solving the PPP problem in the second series of experiments

Задача PPP тем самым решалась в трех вариантах: а) спутники с аномалией в орбите включались в решение; б) спутники с аномалией исключались из решения; в) для спутников с аномалией исправлялась орбита. В качестве эталонных координат брались координаты станции, полученные осреднением трех решений задачи PPP на двухсуточном интервале: в начале, в середине и в конце. В результате было выявлено, что в большинстве случаев исключение спутника с аномалией в орбите из решения задачи PPP, уменьшает ошибку определения координат. Попытки «исправить» орбиту спутника с аномалией в ней только увеличивают ошибку определения координат.

Для оценки качества решения задачи PPP в данной серии экспериментов также определялась евклидова норма расстояния между тремя осредненными координатами и тремя координатами, определенными в решении задачи PPP, их статистика по всем станциям на всех интервалах решения показана в таблице.

Статистика распределения евклидовой нормы расстояния между осредненными и определенными координатами

	Без аномальных спутников	С аномальными спутниками	Для аномальных спутников проведена корректировка орбиты
Максимальное	151 см	115 см	28088 см
Среднее	37 см	36 см	2682 см
СКО	26 см	21 см	3407 см

Как видно из таблицы, решение без спутников с аномалией в орбите в среднем значении на 1 см хуже решения с аномальным спутником, тогда как решение с скорректированной орбитой в среднем хуже на 2682 см.

Заключение

В эфемеридно-временных продуктах аналитических центров ГНСС нередко присутствуют существенные аномалии на стыках суток, что негативно влияет на точность решения навигационных задач. Нами предложена и опробована на 9-летнем временном интервале простая методика нахождения разрывов и других аномалий в публикуемых аналитическими центрами IGS финальных орбитах. Приведенный анализ аномалий показал, что имеет место взаимная компенсация разрывов в орбите и уходе часов спутника при решении задач PPP. Попытки «исправления» орбит с целью удаления разрывов на стыке суток не имеют смысла без соответствующей коррекции уходов часов НКА, что на данном этапе не представляется возможным.

Библиографические ссылки

1. Продукты IGS. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.igs.org/products> (дата обращения: 10.01.2021).
2. Официальный сайт ИАЦ КВНО [Электронный ресурс]. URL: <https://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 10.01.2021).
3. Официальный сайт CODE [Электронный ресурс]. URL: http://www.aiub.unibe.ch/research/code__analysis_center/index_eng.html (дата обращения: 10.01.2021).
4. Официальный сайт ESA [Электронный ресурс]. URL: Режим доступа: <https://www.esa.int> (дата обращения: 10.01.2021).
5. Описание формата SP3-с [Электронный ресурс]. URL: Режим доступа: <ftp://igs.org/pub/data/format/sp3c.txt> (дата обращения: 10.01.2021).
6. Описание формата CLK [Электронный ресурс]. URL: ftp://igs.org/pub/data/format/ginex_clock304.txt (дата обращения: 10.01.2021).
7. Пустошилов А. С. Метод обнаружения малых аномалий в финальных орбитах навигационных спутников ГЛОНАСС // Успехи современной радиоэлектроники. 2019. № 12. С. 142–147. <https://doi.org/10.18127/j20700784-201912-22>.
8. Tsarev S. P., Kytmanov A. A. Discrete orthogonal polynomials as a tool for detection of small anomalies of time series: a case study of GPS final orbits // arXiv preprint arXiv:2004.00414. 2020. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2004.00414> (дата обращения: 10.01.2021).
9. Программа аппроксимации дискретными ортогональными полиномами высоких степеней [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/sptsarev/high-deg-polynomial-fitting> (дата обращения: 01.09.2020).
10. Griffiths J., Ray J. R. On the precision and accuracy of IGS orbits // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83, No. 3-4. P. 277–287.
11. Ray J. Precision, accuracy, and consistency of GNSS products // Encyclopedia of geodesy. Springer, Cham. 2016. P. 1–5.
12. Interface Control Document ICD-GPS-240 [Электронный ресурс]. URL: https://navcen.uscg.gov/pdf/gps/ICD_GPS_240C.pdf (дата обращения: 10.01.2021).
13. Kouba J., Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products // GPS solutions. 2001. Vol. 5, No. 2. P. 12–28.
14. Kouba J. A Guide to Using International GNSS Service (IGS) products [Электронный ресурс]. URL: https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (дата обращения 19.01.2021).
15. Pent G., Luzum B. IERS conventions 2010 // IERS Technical Note. 2010. No. 36.

References

1. IGS Products. Available at: <http://www.igs.org/products> (accessed 10.01.2021).
2. GLONASS information and analysis center for positioning, navigation and timing. Available at: <https://www.glonass-iac.ru/> (accessed 10.01.2021).
3. Center for Orbit Determination in Europe (CODE). Available at: http://www.aiub.unibe.ch/research/code__analysis_center/index_eng.html (accessed: 10.01.2021).
4. The European Space Agency (ESA). Available at: <https://www.esa.int> (accessed: 10.01.2021).
5. SP3-c format description. Available at: <ftp://igs.org/pub/data/format/sp3c.txt> (accessed: 10.01.2021).

6. CLK format description. Available at: ftp://igs.org/pub/data/format/rinex_clock304.txt (accessed: 10.01.2021).
7. Pustoshilov A. S. [Method for detection of small anomalies in final orbits of GLONASS navigation satellites]. *Uspehi sovremennoy radioyelektroniki*. 2019, No. 12, P. 142–147. Available at: <http://www.radiotec.ru/article/24375#english> (accessed: 10.01.2021)
8. Tsarev S. P., Kytmanov A. A. Discrete orthogonal polynomials as a tool for detection of small anomalies of time series: a case study of GPS final orbits. arXiv preprint arXiv:2004.00414. 2020. Available at: <https://arxiv.org/abs/2004.00414> (accessed: 10.01.2021).
9. High degree least squares polynomial fitting using discrete orthogonal polynomials. Available at: <https://github.com/sptsarev/high-deg-polynomial-fitting> (accessed: 01.09.2020).
10. Griffiths J., Ray J. R. On the precision and accuracy of IGS orbits. *Journal of Geodesy*. 2009, Vol. 83, No. 3-4, P. 277–287.
11. Ray J. Precision, accuracy, and consistency of GNSS products. *Encyclopedia of geodesy*. Springer, Cham. 2016, P. 1–5.
12. Interface Control Document ICD-GPS-240. Available at: https://navcen.uscg.gov/pdf/gps/ICD_GPS_240C.pdf (accessed: 10.01.2021).
13. Kouba J., Héroux P. Precise point positioning using IGS orbit and clock products. *GPS solutions*. 2001, Vol. 5, No. 2, P. 12–28.
14. Kouba J. A Guide to Using International GNSS Service (IGS) products. Available at: https://kb.igs.org/hc/en-us/article_attachments/203088448/UsingIGSProductsVer21_cor.pdf (accessed: 19.01.2021).
15. Pent G., Luzum B. IERS conventions 2010. *IERS Technical Note*. 2010, No. 36.

© Пустошилов А. С., Царев С. П., Ушаков Ю. Ю., Овчинникова Е. В. 2020

Пустошилов Александр Сергеевич – старший преподаватель; Институт инженерной физики и радиоэлектроники, Сибирский федеральный университет. E-mail: alphasoft@inbox.ru.

Ушаков Юрий Юрьевич – кандидат физико-математических наук, доцент; Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: yuron@akadem.ru.

Царев Сергей Петрович – доктор физико-математических наук, профессор; Институт космических и информационных технологий, Сибирский федеральный университет. E-mail: sptsarev@mail.ru.

Овчинникова Елена Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент; Институт информатики и телекоммуникаций, кафедра прикладной математики, Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ovchinnikova_ev@sibsau.ru.

Pustoshilov Alexander Sergeevich – senior lecturer; School of Engineering Physics and Radioelectronics, Siberian Federal University. E-mail: alphasoft@inbox.ru.

Ushakov Yuriy Yurievich – Cand. Sc., associate professor, School of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: yuron@akadem.ru.

Tsarev Sergey Petrovich – D. Sc.; professor of the School of Space and Information Technologies, Siberian Federal University. E-mail: sptsarev@mail.ru.

Ovchinnikova Elena Vladimirovna – Cand. Sc., associate professor; School of Informatics and Telecommunications, Department of Applied Mathematics, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ovchinnikova_ev@sibsau.ru.
