

Влияние космической среды на ход бортовых часов

© А. В. Сальцберг, Е. В. Тимошенкова, К. Г. Шупен

АО «РИРВ», г. Санкт-Петербург, Россия

Реферат

Космические часы играют важную роль в успешном выполнении целевых задач различных космических программ. При этом особую значимость приобретает задача оценки критических эффектов влияния космической среды на поведение часов на борту КА. Основные эффекты успешно моделируются и учитываются на этапе разработки прецизионных часов. Однако ввиду постоянного улучшения точностных характеристик квантовых генераторов частоты, используемых в составе бортовых часов ГНСС, возникает необходимость идентификации и корректного учета невоспроизводимых при наземной экспериментальной отработке эффектов, являющихся следствием воздействия космической среды на КА.

Цель работы – обзор отдельных факторов космической среды, в отношении которых влияние на космические часы установлено, находится на стадии рассмотрения либо есть предположения о наличии зависимостей. В контексте данной работы речь идет именно о влиянии данных факторов на ход космических часов, а не об эффектах, возникающих в радиотехническом (или оптическом) тракте распространения сигнала. Эффекты трассы распространения компенсируются использованием комбинации измерений на нескольких частотах (ионосфера) или построением высокоточных априорных моделей и другими методами.

Эффекты первых порядков успешно моделируются и учитываются при разработке прецизионных часов. Однако ввиду постоянного улучшения точностных характеристик квантовых генераторов частоты, используемых в составе бортовых часов ГНСС, появляется необходимость идентификации и корректного учета невоспроизводимых при наземной экспериментальной отработке эффектов малых порядков, возникающих вследствие воздействия космической среды на КА, которые могут быть пропущены при построении моделей.

Поскольку существует множество разнообразных факторов, связанных с космической средой, так же как и систем, участвующих в выполнении целевой задачи КА, то проследить все возможные корреляции между ними не представляется возможным. В данной работе рассмотрено влияние ряда факторов солнечной и геомагнитной активности на работу бортовых часов.

Выполнен обзор актуальных исследований влияния космической среды на бортовые часы, построенные на различных физических принципах. На основе данных измерений проведен анализ взаимосвязей между параметрами солнечной и геомагнитной активности и поведением шкал времени бортовых часов КА систем ГЛОНАСС и GPS.

Ключевые слова: ГНСС, космическая среда, солнечная активность, геомагнитная активность, бортовые стандарты частоты, шкалы времени, частотно-временные поправки.

Контакты: Сальцберг Александра Валерьевна (a.saltsbergn@irt.ru).

Статья поступила в редакцию 10.12.2019, принята к публикации 20.01.2020, опубликована 12.05.2020.

Для цитирования: Сальцберг А. В., Тимошенкова Е. В., Шупен К. Г. Влияние космической среды на ход бортовых часов // Труды ИПА РАН. 2020. Вып. 52. С. 57–62.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.57-62>

Space Environment Effect on the Onboard Clock Behavior

A. V. Saltsberg, E. V. Timoshenkova, K. G. Shupen

Russian Institute of Radionavigation and Time, Saint Petersburg, Russia

Abstract

Space clocks play an important role in the successful achievement of mission objectives for various space programs. Thus, the task of estimating critical effects of space environment on the behavior of the satellite onboard clock is of particular importance. The main effects are successfully modelled and integrated into the design of precision clocks. However, the accuracy characteristics of the atomic frequency standards used as a part of GNSS onboard clocks are continuously improving. It necessitates identification and correct registration of experimental developmental effects, non-reproducible at ground, which originate from the effect of the space environment on a satellite.

The aim of the research is to overview the individual factors of the space environment that are proved to definitely affect the space clock, are still under consideration or are supposed to be interdependent. It is the influence of these factors on the space clock rate but not the effects appearing in radiotechnical (or optical) path that is the object of this review. The effects of the signal path are offset by using a combination of the measurements at several frequencies (ionosphere) or producing high-accuracy *a priori* models, and other methods.

The first order effects are successfully simulated and considered in developing the precision clock. However, due to the constant improvement of accuracy characteristics of the quantum frequency generators used in the onboard clock GNSS there is a need for identifying and accurately registering the small order effects which cannot be reproduced on

the ground, arising as they are from the impact of space environment on a satellite, thus being easily overlooked during the process of model construction.

Since there are numerous factors connected with space environment, as well as systems involved in achieving the satellite mission, it is next to impossible to monitor all the possible correlations between them. The present study examines the impact of a number of solar and geomagnetic activity factors on the performance of onboard clock.

This paper offers an overview of the results of studies in the field of the effect of space environment on the onboard clocks based on various physical principles. The analysis of correlations between the parameters of solar and geomagnetic activities and the behavior of GLONASS and GPS onboard clock time scales is carried out on the basis of the measurement data.

Keywords: GNSS, space environment, solar activity, geomagnetic activity, onboard frequency standards, time scales, satellite clock time offset.

Contacts: Alexandra Saltsberg (a.saltsberg@irt.ru).

Received December 10, 2019, accepted January 20, 2020, published May 12, 2020.

For citation: Saltsberg A. V., Timoshenkova E. V., Shupen K. G. Space environment effect on the onboard clock behavior // Transactions of IAA RAS. 2020. Vol. 52. P. 57–62.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.52.57-62>

Введение

Под космическим пространством понимается среда, в которой имеют место такие естественные явления, как вакуум, магнитное поле, солнечная радиация, плазма, гравитационное поле и т. д., а также находятся объекты искусственного происхождения, в том числе орбитальный мусор. Статистическое описание естественной природы наиболее значимых факторов космической среды и возможность их воспроизведения в земных условиях позволяют оптимизировать проектные работы, снижать риски и уменьшать затраты при эксплуатации аппаратуры на КА. Для изучения динамики изменения окружающего космического пространства осуществлен целый ряд космических миссий, данные которых могут быть использованы для изучения механизмов воздействия космической среды на системы КА. Создаются новые средства моделирования космической среды и разрабатываются функциональные модели, которые могут быть использованы для описания влияния факторов космической среды на характеристики бортовых стандартов частоты, применяемых в составе космических часов.

В настоящее время в космических часах применяются кварцевые генераторы, рубидиевые, цезиевые и водородные стандарты частоты (СЧ). Учитывая, что в ближайшее время основным источником высокостабильной частоты в составе КА серии «Глонасс-К» будет являться СЧ классического типа на рубидиево-газовой ячейке (КСЧ – РГЯ), основное внимание в работе уделено именно этому типу СЧ.

Для оценки критических эффектов влияния космической среды на поведение бортовых часов представляется очевидным воспользоваться более чем 30-летним опытом эксплуатации КСЧ – РГЯ в космической навигационной системе GPS, а также опытом эксплуатации высокостабильных стандартов на разных типах орбит КА.

Солнечная активность

Солнце обладает огромной массой и энергией, и его влияние необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации КА. Сильные вспышки на солнце могут оказать значительное воздействие на электронные компоненты, бортовой вычислитель и камеры на борту КА [1]. Наиболее известный признак солнечной активности – солнечные пятна. Их среднее число меняется в соответствии с 11-летним периодом. Изменчивость солнечного цикла может быть эффективно промоделирована с использованием индекса $F10.7$ – потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10.7 см.

Солнечная среда оказывает существенное воздействие на большинство элементов естественной космической среды. Изменения солнечной среды воздействуют на:

- уровни плотности термосферы;
- полную тепловую среду КА;
- уровни плотности плазмы;
- интенсивность ионизирующей радиации;
- характеристики геомагнитного поля.

Магнитное поле Земли

Магнитное поле Земли (геомагнитное поле) оказывает сильное влияние на явления, происходящие в космической среде, такие как движения плазмы, электрические токи и захваченные заряженные частицы с высокими энергиями [1].

Основные вариации геомагнитного поля:

1) периодические изменения, которые происходят каждые 27 дней, когда область солнечной активности обращена к Земле;

2) дневные изменения, которые происходят из-за перемещения частиц в ионосфере, – полярные (авроральные) и экваториальные потоки заряженных частиц (электроджеты);

3) магнитные штормы, которые происходят во время солнечных вспышек и обычно следуют за тем же самым 27-дневным циклом.

Наиболее распространенными показателями геомагнитной активности являются индексы геомагнитной активности, A_p и K_p .

Чтобы получить достоверные измерения с магнитных датчиков, которые используются в навигационных системах, необходимо точное описание геомагнитной области.

В работе [2] рассмотрено воздействие магнитного поля на характеристики водородных часов Galileo и сделано заключение, что воздействие изменений магнитного поля на характеристики часов Galileo является незначительным, поскольку максимальный эффект составляет менее 0.8 нс (≈ 2.7 пс). Кроме того, экранирование бортовой аппаратуры позволяет уменьшить этот эффект. Однако если те же часы выведены на низкую околоземную орбиту (LEO), где сила магнитного поля на два порядка выше, его влияние необходимо учитывать.

Ионизирующая радиация

Частицы, связанные с ионизирующей радиацией, подразделяются на три основные группы в зависимости от источника излучения [1]: захваченные частицы пояса излучения, космические лучи и частицы, излученные при солнечных вспышках. Частицы с высокой энергией могут проникать сквозь материал КА и вносить вклад в кинетическую энергию, вызывая неисправности, или вносить помехи в работу подсистем.

Напряженность магнитного поля в районе южного Атлантического океана является самой низкой, что приводит к более высокой концентрации захваченного излучения в этом регионе. Именно в районе Южноатлантической аномалии КА может столкнуться с «расстройством» электроники и помехами в работе приборов, поскольку большинство из них чувствительны к воздействию частиц высокой энергии.

Высокоточные кварцевые генераторы (ВКГ) являются ключевым блоком сверхточных приборов для измерения времени. При этом ВКГ чувствителен к космическому излучению [3]. С одной стороны, излучение положительно влияет на процесс старения, под которым понимается возникновение систематического изменения (или линейного ухода) частоты ВКГ за счет изменений кристалла. Этот факт может быть использован, чтобы скомпенсировать деградацию монотонно стареющих бортовых часов. То есть воздействие радиации действует как компенсационный механизм. С другой стороны, частицы высокой энергии, следующие из солнечных вспышек, могут вызвать постоянные смещения частоты кварцевого генератора.

Рубидиевые КСЧ менее чувствительны к космическому излучению. Оценки значения линей-

ного изменения частоты показывают, что воздействие радиации на рубидиевые часы находится не выше уровня $\sim 10^{-14}$ за сутки. Это предположение подкрепляется данными, представленными в работе Samrao и др. по влиянию солнечных вспышек на часы в космосе [4].

Анализ взаимосвязей между параметрами солнечной и геомагнитной активности и поведением шкал времени бортовых часов КА систем ГЛОНАСС и GPS

Несмотря на большое количество работ, посвященных влиянию различных параметров окружающей среды на бортовые часы, систематизированные результаты сравнений влияния отдельных параметров космической среды на поведение часов на борту КА отсутствуют.

Если рассматривать космические часы с позиции «черного ящика», т. е. без попыток оценки возможного воздействия всей совокупности внешних эффектов на какие-то конкретные элементы, входящие в состав стандарта частоты, то можно оценить значимые корреляции.

Целью данной работы являлось сопоставление характера изменения бортовой шкалы времени (БШВ) КА с изменениями факторов солнечной и геомагнитной активности: количества солнечных пятен, индекса потока солнечного радиоизлучения с длиной волны 10.7 см $F_{10.7}$, индекса геомагнитной активности K_p . Для этого был проведен спектральный анализ на основе быстрого преобразования Фурье значений параметров солнечной и геомагнитной активности за 2006–2018 гг. [5] с целью выявления характерных периодов вариаций. Результаты представлены на рис. 1. Были выделены следующие основные периоды для каждого из показателей:

- для числа солнечных пятен: 18, 20, **26**, 45 сут;
- для индекса потока солнечного радиоизлучения $F_{10.7}$: 20, **26**, 34, 44 сут;
- для индекса геомагнитной активности K_p : 7, 9, 12, **26** сут.

Затем спектральный анализ был выполнен для рядов данных GPS и ГЛОНАСС (STA) (ИАЦ КВНО) [6] за 2018 г. Длительности основных периодов вариаций, наблюдаемых в бортовых часах, для ряда КА системы GPS представлены на рис. 2, а для КА системы ГЛОНАСС – на рис. 3. Для КА GPS в 3 случаях из 9 наблюдаются 7-суточные, 20-суточные и 26-суточные циклы, в 5 случаях из 9 – 22-суточные циклы, и в 7 из 9 – 12-суточные циклы. Для КА ГЛОНАСС в 3 случаях из 8 наблюдаются 7-суточные и 33-суточные циклы, в 5 случаях из 8 – 9-суточные, 12-суточные, 17-суточные и 26-суточные циклы.

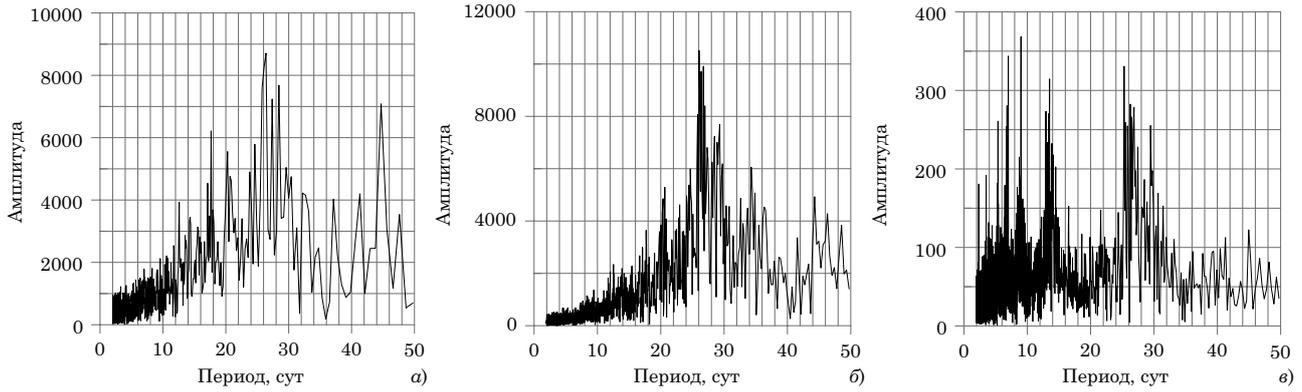


Рис. 1. Спектральный анализ: *а* – значений числа солнечных пятен, *б* – индекса потока солнечного радиоизлучения *F10.7*, *в* – индекса геомагнитной активности *K_p*

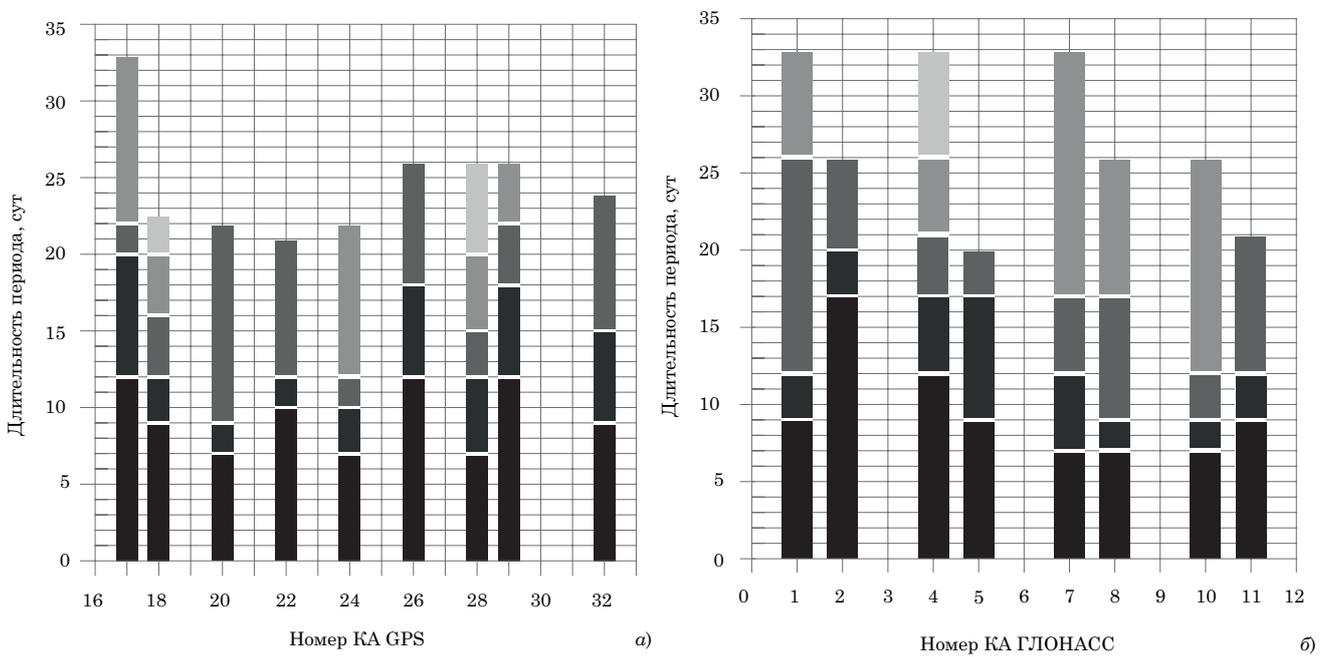


Рис. 2. Длительности основных периодов вариаций, наблюдаемых в спутниковых часах GPS – *а* и ГЛОНАСС – *б*, полученные спектральным анализом данных STA за 2018 г.

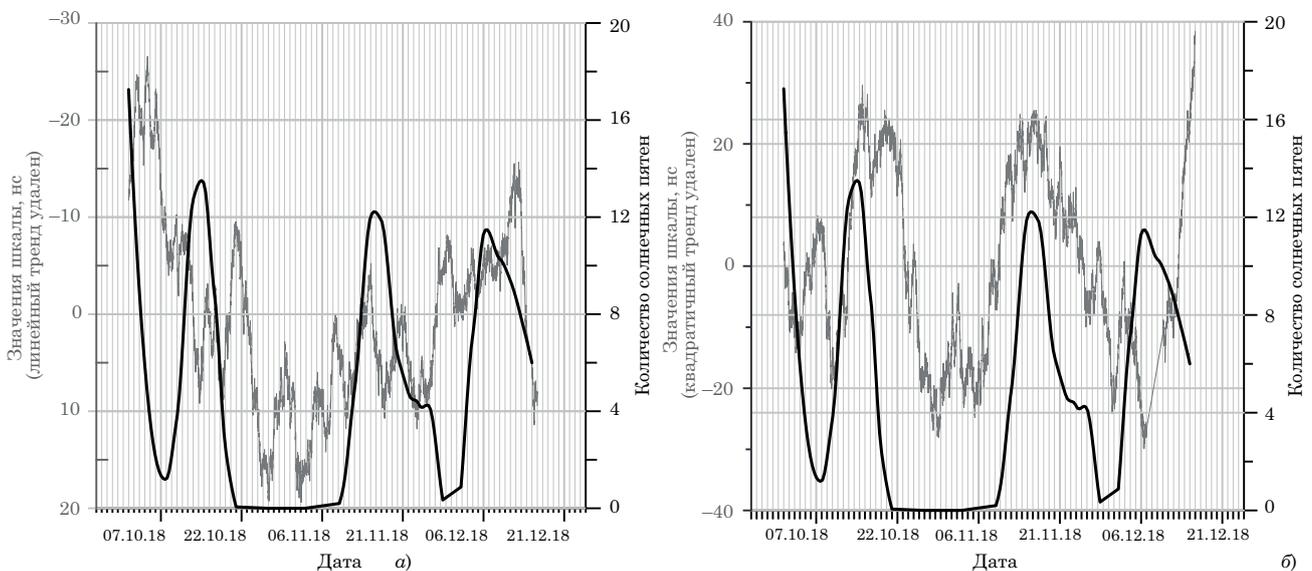


Рис. 3. Сравнение числа солнечных пятен и хода БШВ КА: *а* – КА 2 ГЛОНАСС, *б* – КА 32 GPS

Таким образом, в бортовых часах и параметрах солнечной и геомагнитной активности наблюдаются периодические вариации с аналогичными длительностями периодов. Можно выделить 7, 9, 12 и 26-суточные циклы, что соответствует длительностям периодов вариаций индекса геомагнитной активности Kp на рис. 1в.

На рис. 3–5 наглядно представлены примеры качественного сравнения зависимостей между фазовыми вариациями БШВ КА, вычисленными путем удаления тренда из расхождений шкал времени спутниковых часов GPS и ГЛОНАСС по апостериорным данным ИАЦ КВНО [6] за 2018 г., и полиномиально сглаженными среднесуточными значениями факторов, характеризующих сол-

нечную и геомагнитную активность за соответствующий период [5].

Прослеживается наличие зависимости между изменениями параметров солнечной активности и изменениями хода БШВ КА. При этом не сохраняется строгая прямая или обратная (по знаку) корреляционная зависимость. Однако очевидно, что предвестниками изменения хода БШВ являются изменения показателей солнечной и геомагнитной активности.

Положительным фактором является то, что эти изменения представляют собой медленно меняющиеся по времени вариации (с периодом от нескольких часов до нескольких суток) и могут быть успешно скомпенсированы при построении

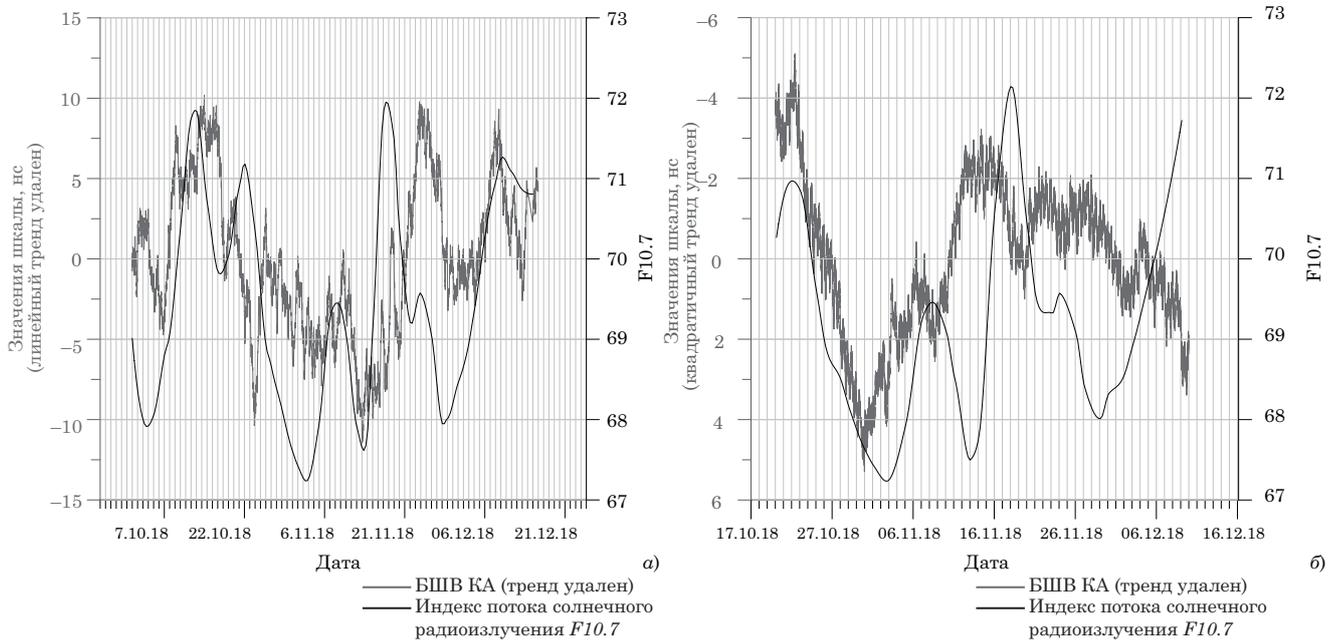


Рис. 4. Сравнение индекса потока солнечного радиоизлучения $F10.7$ и хода БШВ КА: а – КА 1 ГЛОНАСС; б – КА 5 GPS

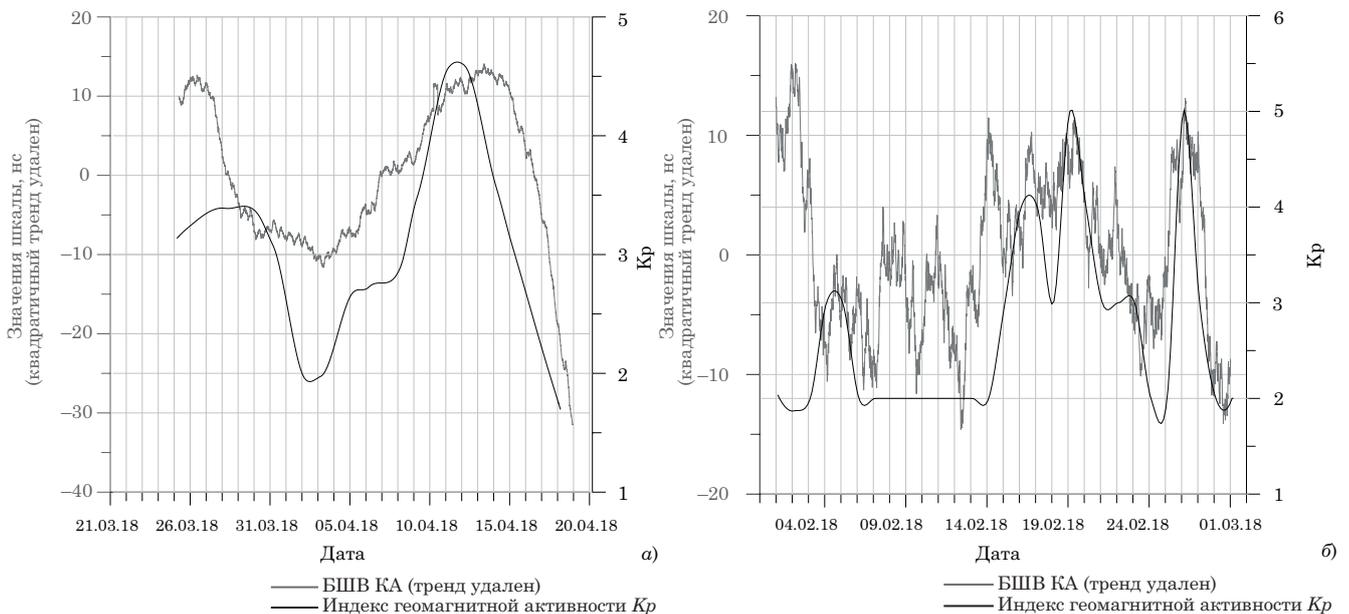


Рис. 5. Сравнение индекса геомагнитной активности Kp и хода БШВ КА: а – КА 9 ГЛОНАСС; б – КА 24 GPS

прогноза. Но если такие часы используются как опорные (например, в космических миссиях по исследованию гравитационного поля), то этот эффект приведет к искажению получаемых результатов.

Заключение

В работе представлены результаты ряда исследований влияния различных факторов космической среды на бортовые часы, основанные на различных физических принципах.

На основе данных измерений проведен анализ взаимосвязей между параметрами солнечной и геомагнитной активности и поведением шкал времени бортовых часов КА систем ГЛОНАСС и GPS.

Для более полного понимания механизмов воздействия солнечной и геомагнитной активности на ход БШВ КА необходимы создание системы непрерывного контроля функционирования БСУ в процессе эксплуатации и дальнейшие развернутые исследования влияния факторов космической среды во взаимодействии со специализированными научными организациями. Развитие систем космического мониторинга состояния магнитосферы и солнечной активности позволит оперативно получать актуальные данные о состоянии кос-

мической среды. Сравнение этих данных с ходом бортовых часов, используемых в ГНСС, на длительном интервале времени позволит выявить закономерности и в перспективе более точно прогнозировать уход БШВ КА путем включения соответствующих параметров в модель ухода БШВ КА.

Литература

1. *James B. F. Norton O. W., Alexander M. B.* The Natural Space Environment: Effects on Spacecraft // NASA Reference Publication 1350. MSFC, Alabama, 1994. 30 p.
2. *Svehla D, Rothacher M, Cacciapuoti L.* Thermal re-radiation acceleration in the GNSS orbit modelling based on Galileo clock parameters // IGS Workshop. Sydney, Australia, 2016. 18 p.
3. *Bloch M., Mancini O., McClelland T.* What we don't know about quartz clocks in space. // Preceedings of the 41st Annual precise time and time interval. Systems and applications meeting. Santa Ana Pueblo, New Mexico, November, 2009. 17 p.
4. *Camparo J. C., Moss S. C., LaLumondiere S. D.* Space-system timekeeping in the presence of solar flares // IEEE A&E Systems Magazine. 2004. P. 3–8.
5. Баллистический Центр Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kiam1.rssi.ru/> (дата обращения: 15.11.2019). Архив данных: <ftp://ftp.kiam1.rssi.ru/pub/gps/solar/> (дата обращения: 15.11.2019).
6. Информационно-аналитический центр координатно-временного и навигационного обеспечения (ИАЦ КВНО) ФГУП ЦНИИмаш. Прикладной потребительский центр [Электронный ресурс]. URL: <http://www.glonass-iac.ru/> (дата обращения: 15.11.2019). Архив данных: <ftp://ftp.glonass-iac.ru/MCC/PRODUCTS/> (дата обращения: 10.11.2019).