

**К 85-ЛЕТИЮ
ДМИТРИЯ СЕРГЕЕВИЧА ЛУКИНА**

УДК 537.87

**ПРИЕМНИК СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ МОДУЛЯ U-BLOX ZED-F9P
ДЛЯ ИОНОСФЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

© 2023 г. Д. А. Когогин^а, *, А. В. Соколов^а, И. А. Насыров^а,
В. О. Дементьев^а, Р. В. Загреддинов^а

^а Казанский (Приволжский) федеральный университет,
ул. Кремлевская, 18, Казань, 420008 Российская Федерация

*E-mail: denis.kogogin@gmail.com

Поступила в редакцию 28.02.2023 г.

После доработки 08.04.2023 г.

Принята к публикации 10.04.2023 г.

Представлены результаты разработки макета приемника сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на основе модуля u-blox ZED-F9P и выполнен сравнительный анализ его характеристик с профессиональными ГНСС-приемниками Trimble Alloy (станция KZN2 сети IGS) и JAVAD TRE-3L в задаче регистрации полного электронного содержания. Отмечено качественно и количественно сравнимое поведение исследуемых параметров для всех типов ГНСС-приемников.

DOI: 10.31857/S0033849423060074, EDN: XMKMWB

ВВЕДЕНИЕ

Двухчастотные фазовые и групповые запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) с начала 90-х годов используются для определения полного электронного содержания (ПЭС) в ионосфере Земли, чтобы исследовать ее отклик на различные естественные и искусственные воздействия. Так как спутники ГНСС двигаются достаточно медленно по небосводу подыоносферная точка остается в пределах исследуемой области в течение продолжительного интервала времени, что позволяет получить информацию о пространственных и временных характеристиках волновых возмущений.

Метод дистанционного зондирования ионосферы сигналами ГНСС нашел широкое применение для изучения различных явлений, возникающих в ионосфере [1], например, в исследованиях ионосферных эффектов экстремальных гелиогеофизических событий, таких как магнитные бури [2, 3], солнечные вспышки [4, 5], затмения [6], а также регулярных событий, например, прохождения солнечного терминатора (СТ) [7, 8]. С помощью данного метода также изучается отклик ионосферы на землетрясения и поиск их предвестников [9] и ее реакция на действие тропических циклонов и внезапных стратосферных потеплений. С середины 2000 годов началось активное использование сигналов навигационных спутников для определения ПЭС вдоль луча спут-

ник-приемник, пересекающего возмущенную область ионосферы во время экспериментов по воздействию на нее мощным коротковолновым радиоизлучением. Такие исследования проводились на стендах HAARP [10, 11] и СУРА [12–14]. Стоит отметить также исследования, которые проведены методом радиозондирования сигналами ГНСС, связаны с изучением возмущений ионосферной плазмы и обусловлены антропогенными воздействиями на нее [15], например, ракетными запусками и инъекцией активного вещества при работе маневровых двигателей космических аппаратов [16, 17]. Часть работ посвящена решению обратной задачи, а именно исследованию вопроса о влиянии ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои в работе ГНСС в периоды различных гелиогеофизических событий [18–20].

В то же время измерения ПЭС и индексов ионосферной активности, основанных на нем, таких как вариации ПЭС (VarTEC), среднеквадратическое отклонение (СКО) относительного наклонного ПЭС в определенном окне (RMSTEC), производная ПЭС (ROT), СКО производной ПЭС на пятиминутном интервале (ROTI), СКО производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора (AATR) и ряда других, существенно зависят от измеренных ГНСС-приемником фазовых и групповых запаздываний ГНСС-сигналов. А так как аппаратная конфигурация и методы обра-

ботки данных в ГНСС-приемнике в большинстве случаев неизвестны исследователю, необходимо иметь возможность оценить качество регистрации ПЭС. Подобный сравнительный анализ регистрации ПЭС для ГНСС-приемников различных производителей, таких как Trimble, Javad, Leica и Septentrio, был проведен в работе [21].

Отметим, что как в нашей стране, так и за рубежом большая часть данных о пространственно-временной динамике состояния ионосферы, полученных методом многочастотного радиозондирования сигналами ГНСС, охватывает такие регионы, как Япония, США, Западная Европа, где плотная сеть ГНСС-станций сложилась раньше, чем на территории нашей страны. Также имеются системы сбора и обмена ГНСС-данными в свободном доступе (IGS, UNAVCO, CORS, CHAIN и др.). Между тем количество постоянно действующих ГНСС-станций на территории Российской Федерации в последнее десятилетие резко увеличивается. В настоящий момент функционируют многочисленные коммерческие и государственные сети.

Однако даже учитывая увеличение ГНСС-станций в последнее десятилетие, плотность и неравномерность распределения базовых ГНСС-станций на территории Российской Федерации, в полной мере не обеспечивает возможность непрерывного мониторинга ближнего околоземного космического пространства методами дистанционного зондирования сигналами ГНСС в данном регионе. В силу описанного выше, оценки уровня возмущенности ионосферы, получаемые на основе этого метода, в частности региональные карты распределения интенсивности вариаций ПЭС, карты ROTI и др., для большей части территории РФ имеют низкое пространственно-временное разрешение.

Активно развивающаяся в настоящее время отрасль воздушных и наземных беспилотных средств становится определяющим фактором развития высокоточного позиционирования с субсантиметровой и большей точностью. Устройства, обеспечивающие такую точность позиционирования должны отвечать дополнительным требованиям: малогабаритность, энергоэффективность и низкая стоимость в сравнении с ГНСС приемниками геодезического класса. Для обеспечения высокой точности позиционирования описанные выше устройства обладают возможностью параллельного приема сигналов во всем частотном диапазоне 1176–1610 МГц основных ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS), что позволяет проводить исследование ионосферы с помощью измерения ПЭС и индексов ионосферной возмущенности, рассчитанных на основе его. На массовом рынке в последнее время стало появляться все больше недорогих ГНСС-модулей и отладочных плат на их основе, поддерживающих параллельный прием навигационных сигналов во

всем частотном диапазоне. К отдельным ГНСС-модулям с возможностью параллельного приема в двух диапазонах (L1+L2 или L1+L5) можно отнести OpenRTK330; ZED-F9P; LC79D и LG69T; BCM47765 и BCM47755; PX1122R и др. К готовым решениям, представленным в виде отладочных плат, позволяющих получать ГНСС-данные с возможностью последующей конвертации в RINEX относятся: simpleRTK2B; PX1122R-EVB; C099-F9P; SparkFun GPS-RTK2 и др. Плюсами таких плат является низкая стоимость, малый вес, низкое энергопотребление, наличие фирменного программного обеспечения для конфигурации и настройки оборудования, относительно большое количество рабочих каналов (от 184 до 230). В то же время необходимо отметить, что в связи с выпуском чипа BCM47755, устанавливаемого в современные смартфоны, количество таких устройств с возможностью регистрации ПЭС по двухчастотной комбинации фазовых измерений на частотах диапазонов L1/L5 будет постоянно увеличиваться.

Таким образом, задача повышения плотности сети ГНСС-станций на территории Российской Федерации за счет разработки мобильного бюджетного ГНСС-приемника, который в первую очередь будет использоваться для ионосферных исследований, является актуальной и востребованной, а технические возможности современных устройств способствуют ее решению.

Цель данной работы – рассмотреть основные характеристики созданного макета ГНСС-приемника и результаты его тестирования в сравнении с профессиональным ГНСС-оборудованием.

1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К РАЗРАБАТЫВАЕМОМУ УСТРОЙСТВУ И ОПИСАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ ГНСС-ПРИЕМНИКА

Исходя из поставленной задачи, разрабатываемый макет мобильного ГНСС приемника должен обладать следующими функциями:

- принимать и сохранять ГНСС-данные (фаза, псевдодалность, отношение несущей к шуму, частота Доплера и др.), полученные от GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou;
- конвертировать их в стандартный RINEX-формат;
- формировать автономный файл с расчетами, включающими в себя только необходимые пользователю параметры;
- отправлять данные на удаленный сервер для оперативной публикации в сети Интернет;
- иметь возможность визуализации данных в режиме реального времени.

Разрабатываемый макет устройства (рис. 1) состоит из: отладочной платы simpleRTK2B, оснащенной ГНСС-модулем u-blox ZED-F9P; одно-

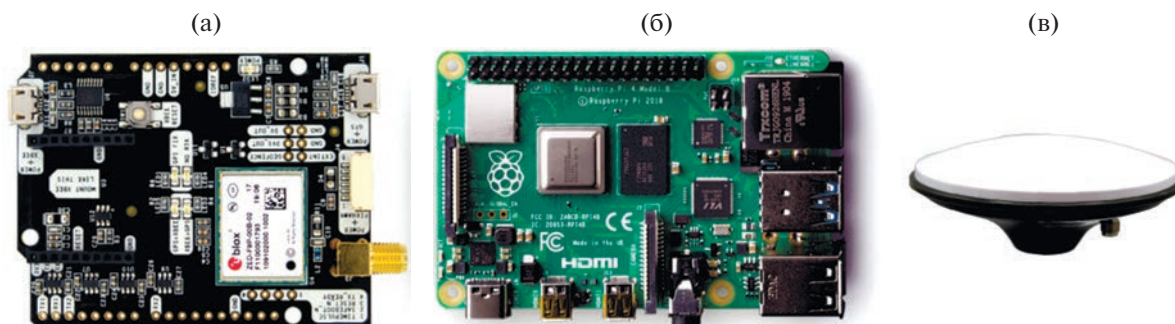


Рис. 1. Основные компоненты устройства: а) отладочная плата simpleRTK2B; б) одноплатный компьютер Raspberry Pi; в) ГНСС-антенна.

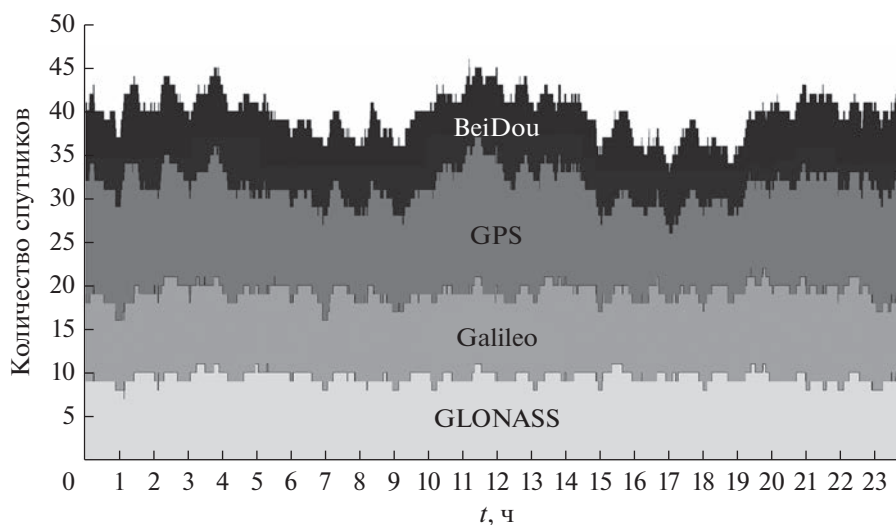


Рис. 2. Суточное изменение количества спутников GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou на макете ГНСС-приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P.

платного компьютера Raspberry Pi; многочастотной ГНСС-антенны; 4G-модема и/или роутера.

Основным компонентом разрабатываемого ГНСС приемника является ГНСС модуль u-blox ZED-F9P — многополосный модуль ГНСС со встроенной многополосной технологией “кинематики реального времени” (RTK), позволяющей добиться точности координатной привязки на уровне сантиметров.

Основные характеристики ГНСС-модуля u-blox ZED-F9P:

- параллельный прием сигналов GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou, QZSS)
- общее количество рабочих каналов 184;
- поддержка многочастотной технологии получения поправок в режиме RTK с быстрым временем сходимости и надежной производительностью;
- поддержка обновлений навигационных данных до 20 Гц;

— наличие фирменного программного обеспечения для конфигурации и настройки оборудования;

— низкая стоимость.

Модуль ZED-F9P относится к типу “параллельных” приемников, т.е. приемников, способных принимать и отслеживать несколько типов ГНСС. Высокочастотный тракт модуля поддерживает все четыре основных типа ГНСС (GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou) и региональной системы QZSS. Все данные со спутников могут приниматься одновременно, что обеспечивает возможность регистрации навигационных сигналов всех основных действующих ГНСС. Суточное изменение общего количества регистрируемых спутников на макете ГНСС-приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P и их разделение по отдельным типам ГНСС представлено на рис. 2. Из рис. 2 видно, что общее количество навигационных спутников в течение суток варьируется от 33 до 46.

Плата simpleRTK2B представляет собой отдельный отладочный инструмент, основанный на модуле u-blox ZED-F9P. Плата simpleRTK2B совместима с большим числом внешних модулей, таких как Arduino, STM32 Nucleo, Raspberry Pi и Pixhawk, и поддерживает подключение множества радиоустройств, обеспечивающих связь по каналам Wi-fi, Bluetooth, 3G, LoRa.

Основные достоинства simpleRTK2B:

- основана на модуле u-blox ZED F9P;
- работает как в базовой, так и в подвижной – конфигурациях;
- имеет широкий спектр ГНСС-возможностей;
- поддерживает легкую интеграцию в комплексные проекты;
- доступна в нескольких комплектациях;
- для синхронизации внешнего оборудования есть выход `timepulse`;
- имеет низкую цену.

Одноплатный компьютер Raspberry Pi используется в данной работе для настройки и отладки платы simpleRTK2B. При этом следует отметить, что для регистрации можно использовать любой современный ПК или ноутбук.

2. ОБЩЕЕ ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ ГНСС-ПРИЕМНИКА

Для отладки и управления платой simpleRTK2B возможны различные сценарии, которые зависят от используемой конфигурации оборудования. Можно подключить отладочную плату simpleRTK2B непосредственно к ПК или ноутбуку под управлением операционной системы (ОС) семейства Windows (Vista и старше) по стандартному `usb` интерфейсу и, использовать разработанную компанией u-blox программу U-center для настройки платы. Для быстрого старта такой подход будет наиболее правильным, так как программа U-center представляет собой мощную платформу для конфигурации, тестирования и визуализации данных для ГНСС-модулей фирмы u-blox и на начальном этапе ее функциональности более чем достаточно. Существенным недостатком программа U-center является то, что она не поддерживается в операционных системах семейства Linux. Поэтому для настройки, отладки и управления ГНСС-приемником с помощью одноплатного компьютера Raspberry Pi4 с установленной на него ОС семейства Linux было написано оригинальное программное обеспечение на языке Python [22]. Использование одноплатного компьютера в качестве управляющего устройства позволяет добиться не только компактных размеров устройства, но и обеспечить его низкое энергопотребление, что в совокупности повышает общую автономность и мобильность разрабатываемого ГНСС-приемника.

Управление ГНСС-приемником в ОС Linux реализовано в двух вариантах. Первый – “классический” – подключение к приемнику с использованием соответствующей периферии: клавиатуры, мыши и монитора. Данный способ хорошо подходит для отладки программного обеспечения, включая визуализацию данных, благодаря использованию всех функций графической оболочки Raspberry Pi OS или любой другой ОС из семейства Linux. Второй – с помощью протокола SSH. Поскольку на Raspberry Pi 4 реализованы несколько сетевых интерфейсов передачи информации, таких как Wi-Fi, Ethernet и USB-модем (по выбору), управлять ГНСС-приемником можно с любого устройства способного воспроизводить и передавать информацию по данному протоколу. При необходимости, присутствует возможность подключения к устройству по протоколу RDP.

В общем случае результатом работы ГНСС-приемника является формирование файла, содержащего ГНСС-данные (фазовые и псевдодалномерные измерения, отношение несущей к шуму и др.). В случае с платой simpleRTK2B формируется файл в двоичном формате UBX. Однако для хранения и обмена ГНСС-данными гораздо удобнее использовать общепринятый формат RINEX. Для конвертации UBX в RINEX была использована библиотека RTKLIB. Общий алгоритм работы ГНСС приемника представлен на рис. 3.

Дополнительно к записи данных в двоичном формате UBX с последующей конвертацией в RINEX реализована возможность записи файла в текстовом формате. Данная опция позволяет записывать в файл только выбранные пользователем параметры.

Для удобной транспортировки и оперативного развертывания на месте проведения эксперимента был разработан и смоделирован корпус ГНСС-приемника в программе 3D-моделирования. Общий вид законченного макета устройства представлен на рис. 4. Питание устройства возможно осуществлять как от сетевого зарядного устройства, так и от внешнего аккумулятора, обеспечивающего напряжение 5 В и ток на выходе 3 А.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ И ПРОВЕРКИ ДАННЫХ

Для тестирования макета ГНСС-приемника и проверки данных было проведено два независимых эксперимента.

Первый эксперимент был проведен на кафедре радиоэлектроники Института физики КФУ 22 июля 2021 г. в интервале 16:00–19:00 UTC. Два приемника u-blox находились на расстоянии около 1 м друг от друга и в ~150 м от базовой станции KZN2 [55.79 с.ш., 49.11 в.д.]. В этом эксперименте исследовались как характеристики макета разра-

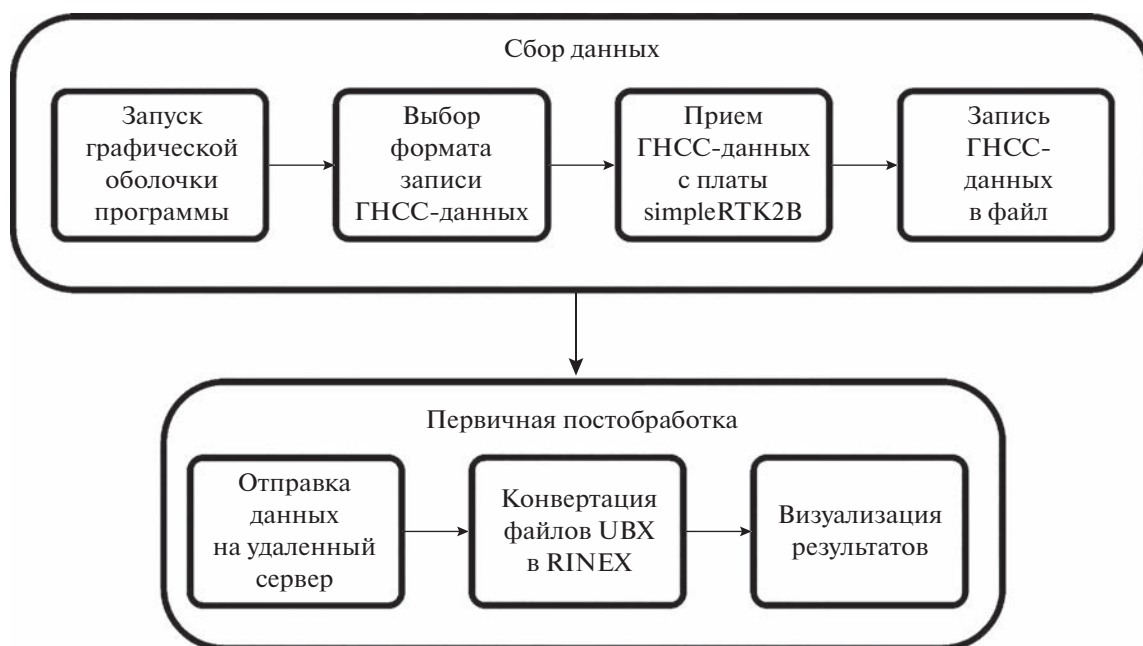


Рис. 3. Общая схема алгоритма работы ГНСС-приемника.

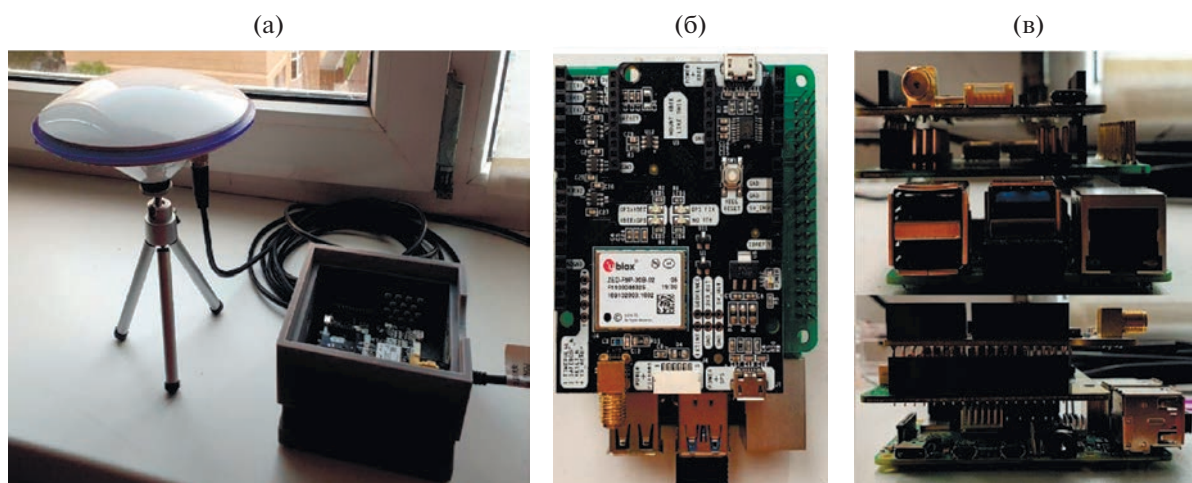


Рис. 4. Фотографии разработанного макета ГНСС-приемника: а) общий вид в корпусе и с ГНСС-антенной; б) вид сверху без корпуса; в) вид сбоку без корпуса.

ботанного ГНСС-приемника, так и влияние используемой ГНСС-антенны на регистрируемые данные от ГНСС GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou. В качестве эталонного и верифицированного источника информации ГНСС-данных выбрана станция KZN2 мировой сети ГНСС-станций IGS, оснащенная профессиональным геодезическим ГНСС-приемником Trimble Alloy с антенной Trimble TRM 59800. Для сравнительного анализа влияния ГНСС-антенн использованы два ГНСС-приемника оригинальной разработки на базе модуля u-blox ZED-F9P, оснащенные

ГНСС-антенной Trimble Zephyr 3 Rover (u-blox 1) и ГНСС-антенной Beitian BT-290 (u-blox 2).

Второй эксперимент был проведен на кафедре физики атмосферы МГУ им. М.В. Ломоносова в период с февраля по март 2022 г. Для иллюстрации полученных результатов были обработаны результаты, полученные 15 февраля 2022 г. В данном эксперименте сравнивали результаты, полученные с помощью макета ГНСС-приемника оригинальной разработки на базе модуля u-blox ZED-F9P и с использованием приемника TRE-3L фирмы JAVAD. Оба приемника были подклю-

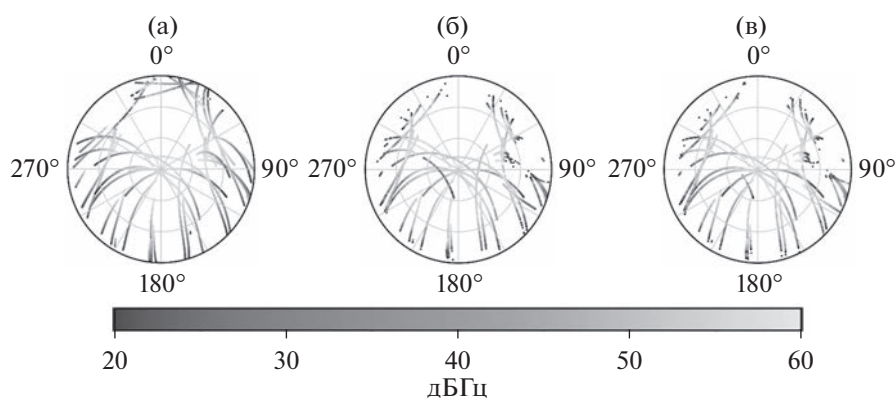


Рис. 5. Траектории движения навигационных спутников в полярной системе координат, используемых для анализа ГНСС-данных в первом эксперименте: а) ГНСС-приемник Trimble Alloy с антенной TRM 59800 (IGS станция KZN2); б) ГНСС-приемник на базе отладочной платы simpleRTK2B с модулем u-blox ZED-F9P с антенной Trimble Zephyr 3 Rover (далее u-blox 1); в) ГНСС-приемник на базе отладочной платы simpleRTK2B с модулем u-blox ZED-F9P с ГНСС антенной BEITIAN BT-290 (u-blox 2). Градацией серого на траектории движения обозначена мощность сигнала на частотах L2 для GPS и ГЛОНАСС, E7 для Galileo и B7 для Beidou.

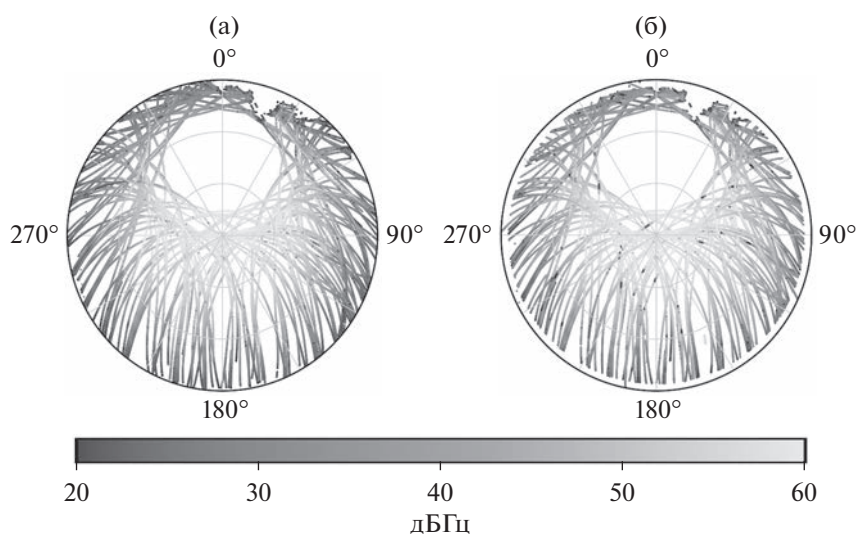


Рис. 6. Траектории движения навигационных спутников в полярной системе для второго эксперимента: а) ГНСС-приемник на базе отладочной платы simpleRTK2B с модулем u-blox ZED-F9P; б) ГНСС-приемник JAVAD TRE-3L. Градацией серого на траектории движения обозначена мощность сигнала на частотах L2 для GPS и ГЛОНАСС, E7 для Galileo и B7 для Beidou.

чены через разветвитель к одной ГНСС-антенне. Траектории движения навигационных спутников в полярной системе координат, используемых для дальнейшего анализа ГНСС данных в первом и втором эксперименте представлены на рис. 5–6 соответственно.

В качестве сравниваемых параметров в обоих экспериментах использованы медианные значения, полученные по всей выборке ГНСС-спутников, а именно данные о мощности сигнала, и полярные индексы оценки ионосферной активности, полученные на основе данных о ПЭС, рассчитанном на основе двухчастотной фазовой комбинации на центральных частотах L1- и L2-диапазонов, такие как вариации относительного наклонного ПЭС

(VarTEC), среднеквадратическое отклонение (СКО) относительного наклонного ПЭС в окне 100 с (RMSTEC), производная ПЭС (ROT), СКО производной ПЭС на пятиминутном интервале (ROTI), СКО производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора (AATR).

В первом эксперименте общая выборка составила 30 спутников для ГНСС-приемника Trimble Alloy, 28 спутников для ГНСС-приемника с модулем u-blox ZED-F9P и антенной Trimble Zephyr3 и 33 спутника для ГНСС-приемника с модулем u-blox ZED-F9P и антенной BEITIAN BT-290. Во втором эксперименте общая выборка составила 76 спутников для ГНСС-приемника JAVAD TRE-3L

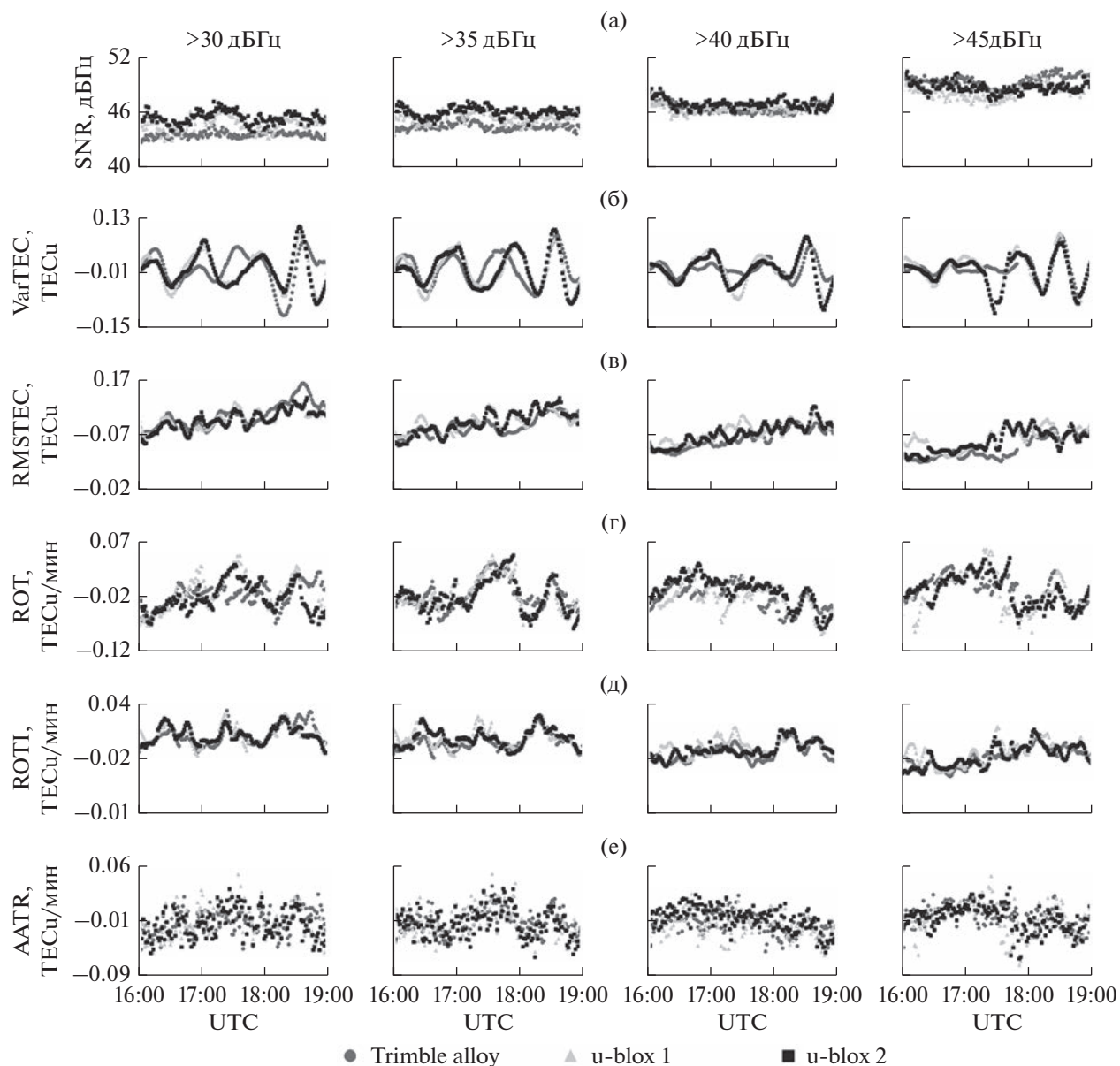


Рис. 7. Медианные значения сравниваемых параметров по всей выборке ГНСС спутников для первого эксперимента при 30, 35, 40 и 45: а) SNR — отношение несущей к шуму; б) VarTEC — вариации относительного наклонного ПЭС; в) RMSTEC — среднеквадратическое отклонение (СКО) относительного наклонного ПЭС в окне 100 с; г) ROT — производная ПЭС; д) ROTI — СКО производной ПЭС на пятиминутном интервале; е) AATR — СКО производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора.

и 71 спутник для ГНСС-приемника с модулем u-blox ZED-F9P.

При обработке данных был использован 30-минутный фильтр срывов фазы сигнала, т.е. если в течение наблюдений не было срывов фазы или временной интервал между срывами равнялся 30 мин и более, то такие промежутки выбирались для дальнейшего анализа. Для фильтрации данных ПЭС использовалось 15-минутное скользящее среднее. Для исследования поведения индексов ROT и AATR использовались вре-

менные промежутки в 5 мин между значениями наклонного ПЭС, для ROTI и RMSTEC этот интервал был равен 15 мин. При обработке данных использовали четыре разных фильтра отношения несущей к шуму, а именно более 30, 35, 40 и 45 дБГц. После фильтрации по данному критерию рассчитывались параметры: мощности сигнала, вариации ПЭС, индексы ROT, ROTI, RMSTEC, AATR (рис. 7 и 8).

Дополнительно был проведен корреляционный анализ медианных значений сравниваемых

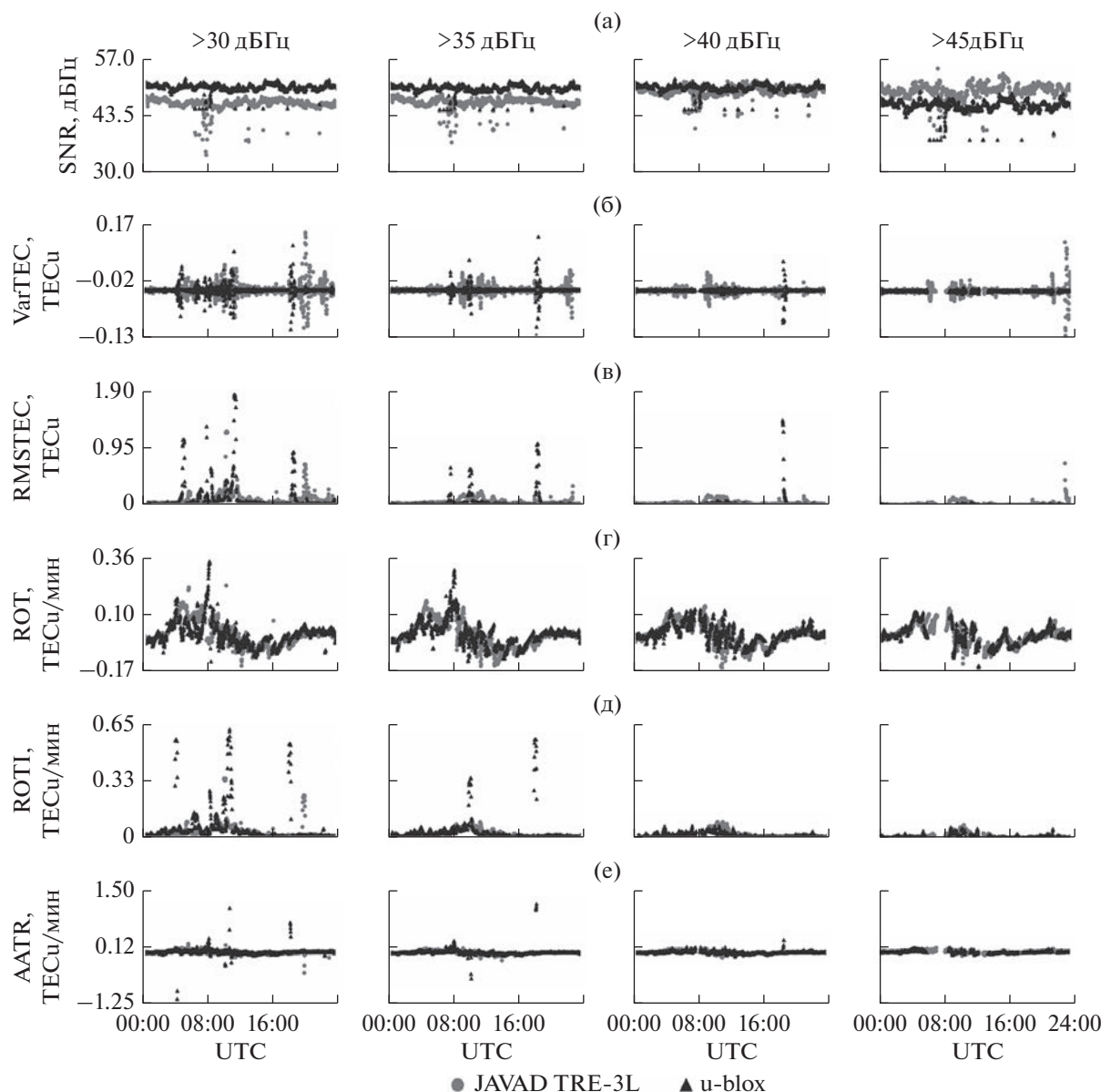


Рис. 8. Медианные значения сравниваемых параметров по всей выборке ГНСС-спутников для второго эксперимента при 30, 35, 40 и 45 дБГц: а) SNR – отношение несущей к шуму; б) VarTEC – вариации относительного наклонного ПЭС; в) RMSTEC – средноквадратическое отклонение (СКО) относительного наклонного ПЭС в окне 100 с; г) ROT – производная ПЭС; д) ROTI – СКО производной ПЭС на пятиминутном интервале; е) AATR – СКО производной ПЭС, нормированной на квадрат наклонного фактора.

параметров, представленных на рис. 7 и 8. Полученные результаты представлены в табл. 1 для первого эксперимента и в табл. 2 – для второго.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Из рис. 7 видно, что профессиональный ГНСС-приемник Trimble Alloy с высококачественной ГНСС-антенной показал ожидаемо лучшие результаты по сравнению с макетом ГНСС-приемника. В первую очередь он имеет су-

щественно меньшее число срывов, особенно при выборке данных выше 40 дБГц. Также отметим, что используемые в эксперименте ГНСС-антенны BEITIAN BT-290 и Trimble Zephyr 3 с макетом ГНСС-приемника не оказали существенного влияния на регистрируемые данные (рис. 7б–7е). Можно лишь отметить незначительно выросший уровень отношения несущей к шуму при использовании ГНСС-антенны Trimble Zephyr 3 (см. рис. 7а). В целом все сравниваемые параметры показывают схожую картину поведения.

Таблица 1. Коэффициент корреляции Пирсона для первого эксперимента

Параметр	Trimble Alloy – u-blox 2	Trimble Alloy – u-blox 1	u-blox 2– u-blox 1
Для данных ≤ 30 дБГц			
SNR	0.47	0.40	0.83
VarTEC	0.30	0.45	0.94
RMSTEC	0.83	0.80	0.88
ROT	0.35	0.50	0.85
ROTI	0.67	0.62	0.84
AATR	0.51	0.58	0.87
Для данных ≤ 35 дБГц			
SNR	0.64	0.55	0.86
VarTEC	0.57	0.58	0.92
RMSTEC	0.72	0.68	0.87
ROT	0.66	0.81	0.82
ROTI	0.70	0.77	0.76
AATR	0.66	0.77	0.82
Для данных ≤ 40 дБГц			
SNR	0.70	0.73	0.74
VarTEC	0.56	0.65	0.93
RMSTEC	0.85	0.80	0.82
ROT	0.67	0.46	0.75
ROTI	0.78	0.80	0.55
AATR	0.66	0.59	0.77
Для данных ≤ 45 дБГц			
SNR	0.50	0.58	0.56
VarTEC	0.71	0.65	0.96
RMSTEC	0.62	0.62	0.74
ROT	0.65	0.65	0.70
ROTI	0.73	0.72	0.73
AATR	0.60	0.61	0.73

Таблица 2. Коэффициент корреляции Пирсона для второго эксперимента

Параметр	JAVAD TRE-3L – u-blox			
	≤ 30 дБГц	≤ 35 дБГц	≤ 40 дБГц	≤ 45 дБГц
SNR	0.76	0.69	0.69	0.46
VarTEC	–0.01	–0.01	0.01	0.03
RMSTEC	0.29	0.53	0.67	0.40
ROT	0.49	0.61	0.66	0.70
ROTI	0.49	0.67	0.62	0.67
AATR	0.42	0.51	0.54	0.63

При обработке выборки данных с фильтрами до 40 дБГц (см. рис. 8) видно существенно большее количество срывов на макете ГНСС-приемника по сравнению с профессиональным ГНСС-приемником JAVAD TRE-3L, что в свою очередь приводит к резким выбросам в рядах сравниваемых параметров. При этом при фильтрации данных выше 40 дБГц картина меняется и данные,

полученные с помощью макета ГНСС-приемника, показывают схожие или даже лучшие результаты.

Таким образом, сделаем следующие выводы. Для первого эксперимента отмечается положительная корреляция для всех параметров и по всем трем станциям. По степени корреляции дан-

ные по паре станций (u-blox 2, u-blox 1) коррелируют немного лучше, чем данные по парам (Trimble Alloy, u-blox 2) и (Trimble Alloy, u-blox 1). Данные по парам (Trimble Alloy, u-blox 2) и (Trimble Alloy, u-blox 1) коррелируют примерно одинаково. При проведении качественного анализа второго эксперимента из данных были удалены отсчеты с сильными выбросами как для ГНСС-приемника JAVAD TRE-3L, так и для макета разработанного ГНСС-приемника, при этом для ГНСС-данных приемника JAVAD TRE-3L таких выбросов значительно больше. Отмечена положительная корреляция по парным данным станций JAVAD TRE-3L – макет ГНСС-приемника с модулем u-blox ZED-F9P для параметров AATR, RMSTEC, ROT, ROTI, SNR. По параметру VarTEC корреляция отсутствует. Данные между станциями во втором эксперименте коррелируют слабее. Кроме того, в данных второго эксперимента по VarTEC отсутствует корреляция между станциями.

По всей видимости, отсутствие корреляции для вариаций ПЭС (параметр VarTEC) для второго эксперимента связано с тем, что ГНСС-приемник JAVAD TRE-3L более чувствителен к шумам и помехам, чем разработанный ГНСС-приемник на базе модуля u-blox ZED-F9P. Из таблицы 5 видно, что при использовании фильтров 40 и 45 дБГц значения коэффициентов корреляции для ионосферных параметров (VarTEC, AATR, RMSTEC, ROT, ROTI) несколько возрастают. Таким образом, более высокие значения корреляции можно получить путем соответствующей настройки приемной аппаратуры.

В целом в ходе корреляционного анализа данных двух экспериментов установлено наличие корреляции между данными, полученными с нескольких станций. Поскольку это синхронные данные одних и тех же параметров, но с разных станций, наличие положительной корреляции между данными свидетельствует о наличии статистической взаимосвязи между этими данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен разработанный макет мобильного бюджетного ГНСС-приемника для исследования ионосферных процессов на базе ГНСС-модуля u-blox ZED-F9P. Выполнено сравнение его характеристик в задаче регистрации ПЭС с профессиональными ГНСС-приемниками Trimble Alloy и JAVAD TRE-3L.

Разработанное устройство способно обеспечить малые научные группы мобильным и доступным по цене оборудованием регистрации ГНСС-данных. Это в свою очередь может способствовать повышению пространственно-временного разрешения карт распределения интен-

сивности вариаций ПЭС за счет увеличения количества станций, созданных на базе данного приемника, и последующему переходу к непрерывному мониторингу процессов, протекающих в околоземном космическом пространстве, ГНСС-методами. На текущем этапе разработки возможности макета ГНСС-приемника позволяют принимать данные с частотой до 1 Гц от всех ГНСС без пропусков данных. Для более высоких частот регистрации (5...20 Гц) предварительно необходимо ввести ограничения по количеству используемых типов ГНСС.

Представленные в работе результаты разработки и тестирования макета ГНСС-приемника на базе модуля u-blox ZED-F9P демонстрируют возможность конкуренции между ГНСС-приемниками из недорогого ценового сегмента с более дорогими по стоимости готовыми решениями геодезического класса, а также целесообразность использования мобильного ГНСС-приемника u-blox ZED-F9P в задаче определения ПЭС и других индексов ионосферной возмущенности на его основе. По результатам анализа полученных экспериментальных данных можно сделать заключение о качественно и количественно сравнимом поведении исследуемых параметров для всех типов исследуемых ГНСС-приемников.

Сеть, состоящая из пяти станций, оснащенных ГНСС-приемниками на базе модуля u-blox ZED-F9P, прошла тестовые испытания в октябре 2021 г. в экспериментах на УНУ стенд СУРА.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность А.М. Падохину за помощь в организации эксперимента в МГУ им. М.В. Ломоносова с ГНСС-приемником JAVAD TRE-3L.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 21-72-00043).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bust G.S., Mitchell C.N.* // Rev. Geophys. 2008. V. 46. № 1. P. RG1003.
<https://doi.org/10.1029/2006RG000212>
2. *Куницын В.Е., Кожарин М.А., Нестеров И.А., Козлова М.О.* // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2004. № 6. С. 67.
3. *Jin S., Luo O.F., Park P.* // J. Geod. 2008. V. 82. № 12. P. 883.
<https://doi.org/10.1007/s00190-008-0217-x>

4. *Tsurutani B.T., Judge D.L., Guarnieri F.L. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. P. L03S09. <https://doi.org/10.1029/2004GL021475>
5. Куницын В.Е., Падохин А.М. // *Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия.* 2007. № 5. С. 68.
6. Афраймович Э.Л., Астафьева Э.И., Воейков С.В. и др. // *Солнечно-земная физика.* 2011. № 18. С. 24.
7. Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. *GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли.* Иркутск, 2006.
8. *Afraimovich E.L., Edemskiy I.K., Voeykov S.V. et al.* // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 1521. <https://doi.org/10.5194/angeo-27-1521-2009>
9. *Pulinets S.A., Boyarchuk K.* *Ionospheric Precursors of Earthquakes.* Berlin: Springer, 2004.
10. *Milikh G., Gurevich A., Zybin K., Secan J.* // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35. № 22. P. L22102. <https://doi.org/10.1029/2008GL035527>
11. *Pradipta R., Lee M.C., Cohen J.A., Watkins B.J.* // *Earth Moon Planets.* 2015. V. 116. № 1. P. 67. <https://doi.org/10.1007/s11038-015-9461-2>
12. *Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Vasiliev A.E. et al.* // *Advances in Space Research.* 2011. V. 47. № 10. P. 1743. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.03.031>
13. *Kunitsyn V.E., Vasilieva E.S., Frolov V.L. et al.* // *Radio Sci.* 2012. V. 47. № 4. P. RS0L15. <https://doi.org/10.1029/2011RS004957>
14. Фролов В.Л., Болотин И.А., Комраков Г.П. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2012. Т. 55. № 6. С. 393.
15. *Perevalova N.P., Shestakov N.V., Voeykov S.V. et al.* // *Geophys. Res. Lett.* V. 42. № 16. P. 6535. <https://doi.org/10.1002/2015GL064792>
16. *Ishin A.B., Voeykov S.V., Perevalova N.P., Globa M.V.* // *PIERS 2017, St Petersburg, 22–25 May 2017.* <https://doi.org/10.1109/PIERS.2017.8262147>
17. *Chou M.-Y., Shen M.-H., Lin C.C.H. et al.* // *Space Weather.* 2018. V. 16. № 2. P. 172. <https://doi.org/10.1002/2017SW001738>
18. Захаров В.И., Ясюкевич Ю.В., Титова М.А. // *Космич. исслед.* 2016. Т. 54. № 1. С. 23. <https://doi.org/10.7868/S0023420616010143>
19. Ясюкевич Ю.В., Живетьев И.В., Ясюкевич А.С. и др. // *Совр. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса.* 2017. Т. 14. № 1. С. 88. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-1-88-98>
20. Ясюкевич Ю.В., Сыроватский С.В., Падохин А.М. и др. // *Изв. вузов. Радиофизика.* 2019. Т. 62. № 12. С. 906.
21. *Demyanov V., Sergeeva M., Fedorov M. et al.* // *Remote Sens.* 2020. V. 12. № 19. P. 3268. <https://doi.org/10.3390/rs12193268>
22. Соколов А.В., Козогин Д.А. Программа регистрации ГНСС данных для модуля u-blox ZED-F9P. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022612868. Оpubл. офиц. бюл. “Программы для ЭВМ, базы данных, топологии интегральных микросхем” от 01.03.2022.