
СИБИРСКАЯ СЕТЬ ПРИЕМНИКОВ СИГНАЛОВ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ SIBNET: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ

SIBNET — SIBERIAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM NETWORK: CURRENT STATE

Ю.В. Ясюкевич

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, yasukevich@iszf.irk.ru*

А.М. Веснин

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, artem_vesnin@iszf.irk.ru*

Н.П. Перевалова

*Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pereval@iszf.irk.ru*

Yu.V. Yasyukevich

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, yasukevich@iszf.irk.ru*

A.M. Vesnin

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, artem_vesnin@iszf.irk.ru*

N.P. Perevalova

*Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pereval@iszf.irk.ru*

Аннотация. В 2011 г. в ИСЗФ СО РАН было начато развертывание постоянно действующей сети приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем. К настоящему моменту в Сибирском регионе на регулярной основе функционируют девять измерительных пунктов сети SibNet (восемь постоянных и один временный). На этих пунктах расположены двенадцать приемников: девять мультисистемных мультисистемных приемников Javad и три специализированных приемника NovAtel GPStation-6, предназначенных для измерения ионосферных фазовых и амплитудных мерцаний. Развернутая сеть позволяет проводить широкий спектр ионосферных исследований, а также изучать качество позиционирования на основе навигационных систем в различных гелиогеофизических условиях. В настоящей статье приведены общая информация о сети, ее технические характеристики и современное состояние, а также сформулированы основные задачи, которые могут решаться с помощью развернутой сети.

Ключевые слова: ионосфера, ГНСС, GPS, ГЛОНАСС, Galileo, Beidou, полное электронное содержание, мерцания, Javad, NovAtel.

Abstract. In 2011, ISTP SB RAS began to deploy a routinely operating network of receivers of global navigation satellite system signals. To date, eight permanent and one temporal sites in the Siberian region are operating on a regular basis. These nine sites are equipped with 12 receivers. We use nine multi-frequency multi-system receivers of Javad manufacturer, and three specialized receivers NovAtel GPStation-6 designed to measure ionospheric phase and amplitude scintillations. The deployed network allows a wide range of ionospheric studies as well as studies of the navigation system positioning quality under various heliogeophysical conditions. This article presents general information about the network, its technical characteristics, and current state, as well as the main research problems that can be solved using data from the network.

Keywords: ionosphere, GNSS, GPS, GLONASS, Beidou, total electron content, scintillations, Javad, NovAtel.

ВВЕДЕНИЕ

В последние двадцать лет глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) стали существенной частью экономической (в широком смысле) деятельности человека [Hofmann-Wellenhof et al., 2008]. На первом этапе существовало две ГНСС: американская система GPS (Global Positioning System) и российская ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система). В настоящее время практически завершено развертывание ГНСС Beidou/Compass в Китае, запущено более половины группировки европейской системы Galileo, развертываются спутники поддержки SBAS (Satellite Based Augmentation System).

С одной стороны, ГНСС обеспечили возможность для достаточно точной независимой навига-

ции, что нашло широкое применение в строительстве, сельском хозяйстве, авиации, картографии и других областях. С другой стороны, ГНСС дают новый богатый экспериментальный материал по физике ионосферы, атмосферы, а также геодинимике. В области физики ионосферы появилось большое количество работ, основанных на двухчастотных фазовых измерениях, выполняемых приемниками ГНСС. Первые работы велись в основном с использованием системы GPS по причине наличия достаточного числа станций и стабильно работающей орбитальной группировки. В последние годы широко используется отечественная система ГЛОНАСС и все активнее используются альтернативные ГНСС, такие как Beidou/Compass [Kunitsyn et al., 2016] и SBAS [Kunitsyn et al., 2015]. В ионосферных исследованиях основным параметром, определяемым с помощью

ГНСС-измерений, является полное электронное содержание (ПЭС, TEC — Total Electron Content). Единица измерения ПЭС — TECU (Total Electron Content Unit), $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ м}^{-2}$.

Значительная часть опубликованных работ, связанных с ГНСС-исследованиями ионосферы, посвящена изучению ионосферных неоднородностей различного масштаба [Афраимович, Перевалова, 2006; Jakowski et al., 2012a; Afraimovich et al., 2013; Otsuka et al., 2013; Ding et al., 2014] и ионосферных мерцаний [Aarons, 1997; Mitchell et al., 2005], картированию ионосферы [Hernández-Pajares et al., 2009] и определению абсолютных ионосферных параметров [Ясюкевич и др., 2017a; Lanyi, Roth, 1988], а также ГНСС-радиотомографии ионосферы [Ruffini et al., 1998; Mitchell, Spencer, 2003; Nesterov, Kunitsyn, 2011]. Широкое применение находит технология ассимиляции. Ассимиляционные модели, например Utah State University Global Assimilation of Ionospheric Measurements (USU-GAIM) Model [Schunk et al., 2004] или модель Центральной аэрологической обсерватории Росгидромета [Solomentsev et al., 2012], используются как для научных исследований физики процессов, так и для решения ряда других задач. В прикладном аспекте ГНСС используются для корректировки радиотехнических систем [Афраимович, Ясюкевич, 2008; Ясюкевич и др., 2017б], включая радарные системы [Ovodenko et al., 2015], для улучшения качества моделей [Arikan et al., 2016], что особенно актуально в системах реального времени [Zolesi et al., 2004].

Развивается направление построения индексов состояния ионосферы и околоземного космического пространства на основе данных ГНСС. В настоящий момент широко известен индекс ROTI — Rate-of-TEC index [Pi et al., 1997] и его улучшенные версии AATR — Along Arc TEC Rate [Juan et al., 2018] и DIX — Disturbance Ionosphere indeX [Jakowski et al., 2012b]. Существуют индексы, показывающие возмущенность ионосферы локально [Voeikov et al., 2016], регионально [Nesterov et al., 2017] и глобально [Gulyaeva, Stanislawski, 2008]. Кроме того, разработана методика оценки общего уровня ионосферной плазмы — глобального электронного содержания (ГЭС) [Афраимович et al., 2008], основанная на технологии глобальных ионосферных карт (GIM — Global Ionosphere Maps) [Mannucci et al., 1998; Schaer et al., 1998].

В области физики нейтральной атмосферы ГНСС позволяют определять содержание водяного пара [Лухнева и др., 2016; Bevis et al., 1992] и осуществлять его томографическую реконструкцию [Bender et al., 2011; Dong, Jin, 2018]. В последние годы появились работы по мониторингу дождей на основе таких данных [Priego et al., 2017].

В области геодинамики ГНСС-измерения дают возможность определять косейсмические и постсейсмические деформации, движение литосферных плит и деформацию земной коры на границе этих плит, деформации, обусловленные вулканической активностью и статическим давлением льда [Саньков и др., 2014; Segall, Davis, 1997; Mazzotti et al., 2003; Likhnev et al., 2010; Shestakov et al., 2011]. Ряд

интересных работ связан с сейсмоионосферным взаимодействием [Devi et al., 2014; Jin et al., 2015] и взрывным воздействием космических тел [Perevalova et al., 2015]. Отдельно следует упомянуть работы по использованию ГНСС для рефлектометрических наблюдений, например, для измерения высоты уровня моря [Larson, Nievinski, 2013; Padokhin et al., 2017] и измерения высоты снежного покрова [Löfgren et al., 2011].

Всеми этими исследованиями способствовало развитие глобальных и региональных сетей приемников сигналов ГНСС, предоставляющих к своим данным свободный доступ. Одной из основных сетей, предоставляющих данные для мирового сообщества, является IGS (International GNSS Service) — международное объединение, включающее оборудование различных учреждений [Dow et al., 2009]. Существуют и другие достаточно крупные сети, такие как UNAVCO [<http://www.unavco.org>]. Одна из крупнейших региональных сетей GSI в Японии включает ~1200 станций [<ftp://terras.gsi.go.jp/data>]. Кроме того, существуют достаточно небольшие сети в областях повышенного интереса, такие как канадская сеть CHAIN — Canadian High Arctic Ionospheric Network [Jayachandran et al., 2009], KASI GDC — Korea Astronomy and Space Science Institute Global Data Center [<ftp://nfs.kasi.re.kr/gps/data/daily>], SONEL — Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales [<ftp://ftp.sonel.org/gps/data>], TrigNet [<ftp://ftp.trignet.co.za>] и др. Общее число приемников на сегодняшний день составляет ~8000 [Tsugawa et al., 2018].

На территории РФ также существует ряд постоянно действующих сетей приемников ГНСС, например: NIVE (Индустриальные геодезические системы, [<https://hive.geosystems.aero>]), SmartNet [<http://smartnet-ru.com>], EFT-CORS [<https://eft-cors.ru>], RTKNet «Геодетика» [<http://rtknet.ru>], а также сеть Росгидромета [Алпатов и др., 2012] и сеть ДВО РАН [Сорокин и др., 2017]. Стоит отметить, что основная часть этих сетей размещена в европейской части РФ, а их данные не всегда доступны широкому кругу пользователей. В связи с этим создание сети ГНСС-приемников в Сибирском регионе является актуальным. В настоящей работе представлены текущее состояние Сибирской сети SibNet (Siberian GNSS Network) постоянно действующих ГНСС-приемников, ее технические характеристики и потенциальные возможности.

1. СОСТАВ СЕТИ SibNet И ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИЕМНИКОВ

Развертывание сети SibNet началось в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) в 2011 г. Основное назначение сети — мониторинг ионосферы и ионосферных возмущений. В то же время предусмотрена возможность использования данных сети для проведения геодинамических исследований. На первом этапе развертывания сети (2011–2015) осуществлялись приобретение и установка приемников фирмы JAVAD. На втором этапе (2015–2018) в допол-

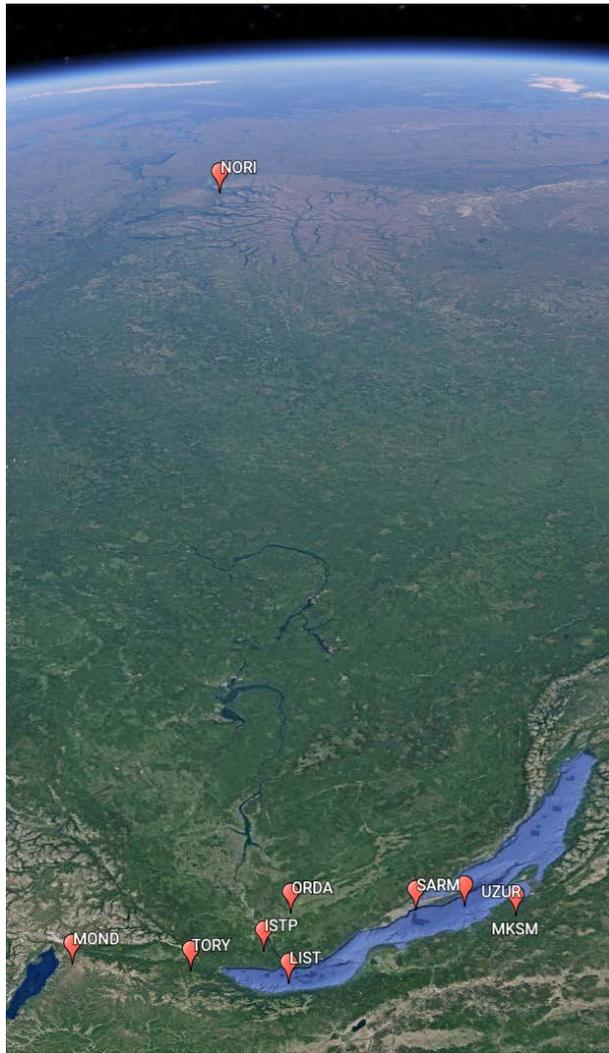


Рис. 1. Схема расположения приемных пунктов сети SibNet

нение к приемникам JAVAD устанавливались специализированные приемники фирмы NovAtel.

Для обеспечения бесперебойной работы приемников постоянно действующей сети в месте установки приемника должна существовать инфраструктура, включающая стабильное электроснабжение, контроль температуры и влажности, охрану, канал передачи данных (по возможности). Поэтому размещение приемников в основном проводилось в обсерваториях ИСЗФ СО РАН, которые находятся на территории Иркутской области, Бурятии, Красноярского края. Схема расположения приемных пунктов сети SibNet представлена на рис. 1. Можно видеть, что все станции, кроме одной, расположены вокруг оз. Байкал и довольно плотно сгруппированы по широте.

В таблице представлены параметры приемников сети SibNet. Здесь ϕ , P , Δf , I/Q , $\sigma\phi$, $S4$ обозначают фазу сигнала, групповую псевдодальность, доплеровский сдвиг частоты, синфазную/квадратурную компоненты сигнала, среднеквадратичное отклонение (СКО) фазы, индекс амплитудных мерцаний соответственно. Большинство приемников JAVAD регистрирует навигационные сигналы спутниковых систем GPS, ГЛОНАСС, Galileo, SBAS. Один из приемников (установленный в п. Листвянка, LIST) регистрирует сигналы китайской спутниковой системы



Рис. 2. Оборудование, используемое в сети SibNet. Верхний ряд: ГНСС-приемники JAVAD Delta (а), JAVAD SigmaQ (б), NovAtel GPStation-6 (в). Нижний ряд: ГНСС-антенны GrAnt-G3T (г), RingAnt-G3T (д), GNSS-750 (е)

Compass/Beidou. Регистрация сигналов SBAS, а также Beidou позволяет проводить геостационарные измерения на практически неподвижных лучах [Kunitsyn et al., 2015, 2016]. Внешний вид приемников JAVAD показан на рис. 2, а, б. Приемники JAVAD Delta-G3T (рис. 2, а), установленные в пунктах ISTP, NORI, LIST, MOND, ORDA, SARM, UZUR, MKSM, и приемник JAVAD SigmaQ-G3T (рис. 2, б), установленный в пункте TORY, оснащены антеннами RingAnt-G3T (рис. 2, д) с подавлением многолучевости. Облегченная антенна GrAnt-G3T (рис. 2, г) используется для выездных измерений.

Большинство приемников JAVAD сети SibNet способны проводить измерения с частотой 50 Гц. Для основных задач физики ионосферы и мониторинга состояния околоземного космического пространства такое разрешение избыточно. Суточный объем данных по одному пункту в режиме записи 50 Гц составляет ~ 10 Гб, что значительно усложняет передачу данных и их хранение и делает запись таких данных по всей сети в регулярном режиме измерений нецелесообразной. В связи с этим только один из приемников осуществляет постоянную запись с частотой 50 Гц. Для сокращения издержек на передачу данных в качестве такого приемника был выбран пункт ISTP, расположенный в здании ИСЗФ СО РАН.

Приемники NovAtel GPStation-6 являются специализированным оборудованием для измерений амплитудных и фазовых мерцаний [Shanmugam et al., 2012]. Подобные измерения позволяют проводить анализ мелкомасштабной структуры ионосферных возмущений [Yeh, Liu, 1982]. Приемник NovAtel GPStation-6 измеряет индекс амплитудных мерцаний $S4$ и СКО фазы $\sigma\phi$ на частотах L1/L2/L5 GPS и L1/L2 ГЛОНАСС. Временное разрешение таких измерений — 1 мин. Внешний вид приемника NovAtel с антенной GNSS-750 представлен на рис. 2, в, е. Данные приемники в настоящее время установлены в пунктах ISTP, TORY, NORI.

В пунктах ISTP, TORY, NORI, LIST, MOND, UZUR, SARM на текущий момент имеются каналы передачи данных. Измерения с этих пунктов могут достаточно оперативно передаваться в ИСЗФ СО РАН и обрабатываться. Данные остальных пунктов передаются с курьером с периодичностью от месяца

Параметры приемной аппаратуры

Пункт	Приемник/Антенна	Регистрируемые сигналы	Регистрируемые параметры	Временное разрешение (регулярное/максимальное), с	Дата запуска тестовых измерений	Канал данных	Местоположение
ISTP	JAVAD Delta-G3T / Javad RingAnt-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2; Galileo E1/E5A; SBAS L1/L5	$\varphi, P, \Delta f, I/Q$	0.02/0.02	16.02.2012	+	г. Иркутск, Иркутская область, 52.2° N, 104.3° E
	NovAtel GPStation-6 / Javad RingAnt-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2	$\varphi, P, \Delta f,$ $S4, \sigma\varphi$	1/0.02 60/60	07.08.2014		
TORY	JAVAD SigmaQ-G3T (с возможностью приема сигнала с 4 антенн) / 3 антенны Javad RingAnt-G3T	Антенна 1: GPS L1/L2; GLONASS L1/L2; Galileo E1/E5A; SBAS L1/L5 Антенна 2: GPS L1/L2	$\varphi, P, \Delta f, I/Q$	1/0.02	20.03.2012	+	с. Торы, Республика Бурятия, 51.8° N, 103.1° E
	NovAtel GPStation-6 / Javad RingAnt-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2	$\varphi, P, \Delta f,$ $S4, \sigma\varphi$	1/0.02 60/60	16.07.2016		
NORI	JAVAD Delta-G3T / Javad RingAnt-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2; Galileo E1/E5A; SBAS L1/L5	$\varphi, P, \Delta f, I/Q$	1/1	11.10.2014	+	г. Норильск, Красноярский край, 70.0° N, 88.0° E
	NovAtel GPStation-6 / Javad RingAnt-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2	$\varphi, P, \Delta f,$ $S4, \sigma\varphi$	1/0.02 60/60	14.02.2018		
LIST	JAVAD Delta-G3T	GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2 Beidou L2/L7	$\varphi, P, \Delta f, I/Q$	1/0.02	15.06.2012	+	п. Листвянка, Иркутская область, 51.8° N, 104.9° E
MOND		GPS L1/L2/L5; GLONASS L1/L2; Galileo E1/E5A; SBAS L1/L5		1/0.02	11.09.2012	+	с. Монды, Республика Бурятия, 51.6° N, 100.9° E
ORDA				1/0.02	14.06.2011	-	п. Мишелевка, Иркутская область, 52.9° N, 103.3° E
SARM				1/0.02	02.12.2013	+	д. Сарма, Иркутская область, 53.1° N, 106.8° E
UZUR				1/0.02	18.03.2013	+	п. Узур, Иркутская область, 53.3° N, 107.7° E
MKSM Временный пункт				1/1	27.04.2014	-	с. Максимиха, Республика Бурятия 53.3° N, 108.7° E

до полугода. Во временном пункте MKSM оборудование функционирует в тестовом режиме.

2. ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ В ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСЕРВАТОРИИ (с. ТОРЫ)

В Геофизической обсерватории ИСЗФ СО РАН (с. Торы) в настоящее время установлено два приемника — JAVAD SigmaQ-G3T и NovAtel GPStation-6. Приемник JAVAD SigmaQ-G3T позволяет осуществлять измерения сигналов спутников GPS на четырех разнесенных антеннах одновременно, а также сигналов ГЛОНАСС на основной антенне. Это дало возможность развернуть интерферометр с малой базой ~20 м с измерением на трех антеннах (TORY-A — основная антенна, Tory-B,

Tory-C; см. рис. 3), который может использоваться для определения скоростей и направлений мелко-масштабных неоднородностей методами, аналогичными разработанным в [Афраймович, 1982; Афраймович, Перевалова, 2006]. Для дополнения указанных измерений на малой базе в 2016 г. был установлен приемник NovAtel GPStation-6, аналогичный установленному в пункте ISTP.

Установка комплекса для детектирования мелко-масштабных неоднородностей в п. Торы обусловлена наличием там дополнительных оптических и радиофизических средств измерений [Афраймович и др., 2012], а также планируемым в ближайшем будущем размещением современного наблюдательного оборудования в рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» [Олемской, 2017].



Рис. 3. Схема расположения приемного оборудования в Геофизической обсерватории (с. Торы). Метки указывают на расположение антенны приемника NovAtel, а также трех антенн приемника JAVAD SigmaQ-G3T (Tory-A, Tory-B, Tory-C)

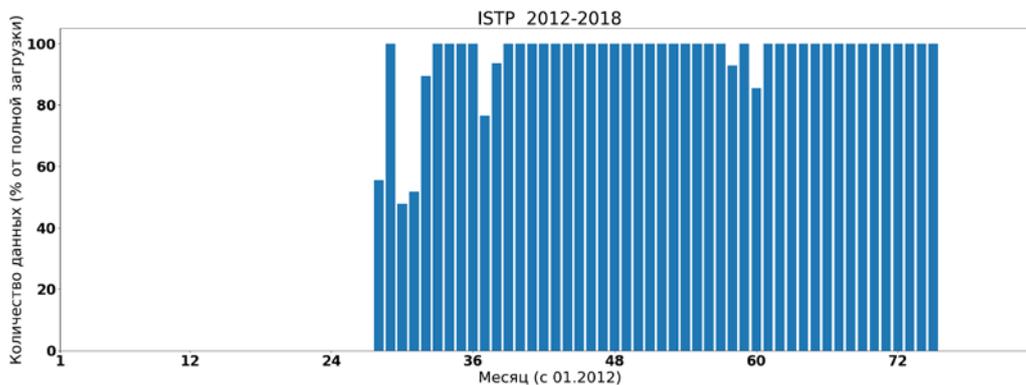


Рис. 4. Объем записанных данных с частотой измерений 50 Гц на пункте ISTP. Приведен общий объем полученных данных в процентном отношении от теоретического месячного значения

3. БАНК ДАННЫХ

Измерения ГНСС-приемников сети SibNet хранятся на сервере в ИСЗФ СО РАН. На рис. 4 представлена статистика сбора данных с частотой измерений 50 Гц в пункте ISTP (здание ИСЗФ СО РАН в Иркутске), данные которого обладают наибольшей целостностью. Каждый столбик на рис. 4 соответствует месяцу наблюдений. Начало ряда соответствует январю 2012 г.

На рис. 5 представлена статистика сбора данных с частотой измерений 1 Гц в измерительных пунктах сети SibNet (LIST, MKSM, MOND, NORI, ORDA, SARM, UZUR, TORY). Отсутствие данных в 2017–2018 гг. на станциях ORDA, SARM, MKSM связано с отсутствием канала данных. Как можно видеть, в работе приемников случаются достаточно частые перебои, вызванные различными причинами. Пропуски измерений в пункте NORI связаны с плохим качеством электропитания и с аварийными отключениями оборудования. Проблема с электропитанием в пункте LIST приводит к постоянным выходам из строя аккумуляторных батарей и в результате к снижению надежности работы управляющего компьютера. В пунктах LIST и UZUR происходили раз-

рывы кабеля антенны. В пункте TORY в 2016–2017 гг. наблюдался отказ программного обеспечения. Удаленность наблюдательных пунктов вызывает дополнительные затруднения при восстановлении работоспособности оборудования.

4. ПРИМЕРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Данный раздел посвящен примерам использования измерений на сети SibNet. В качестве примера мы выбрали измерения во время магнитной бури 22–23 июня 2015 г. [Astafyeva et al., 2017].

4.1. Вариации ПЭС

Одним из основных ионосферных параметров, определяемых с помощью ГНСС, является полное электронное содержание (ПЭС) и его вариации. На рис. 6 представлена динамика геостационарного ПЭС на луче пункт ORDA — спутник SBAS S27 (а), а также ГНСС-ПЭС на луче пункт NORI — спутник GPS G01 (б). Геостационарные данные позволяют получить суточный ход ПЭС. Во время главной фазы бури 22–23 июня 2015 г. в суточном ходе хорошо

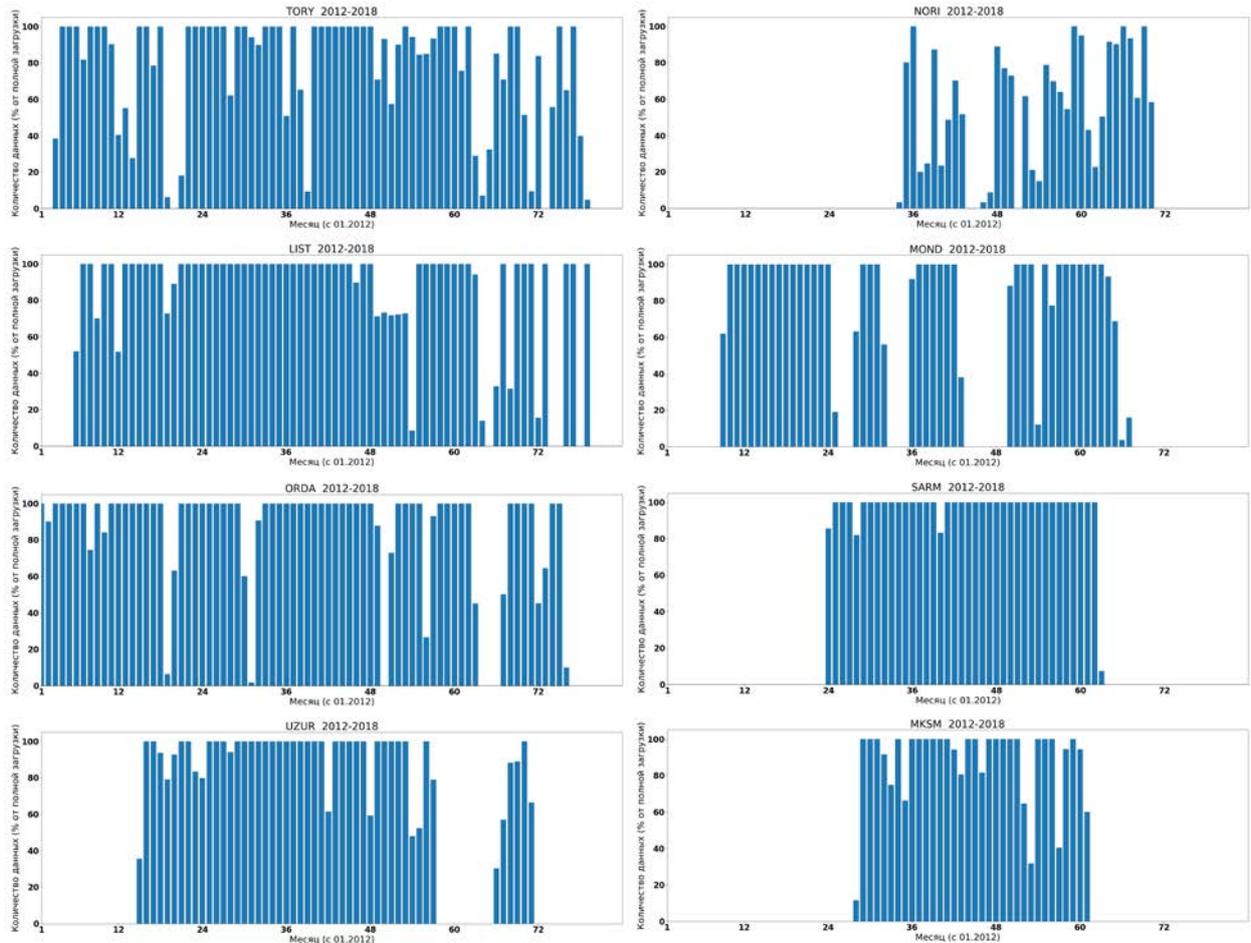


Рис. 5. Объем записанных данных с частотой измерений 1 Гц на приемниках сети SibNet. Названия пунктов указаны на панелях. Приведен общий объем полученных данных в процентом отношении от теоретического месячного значения

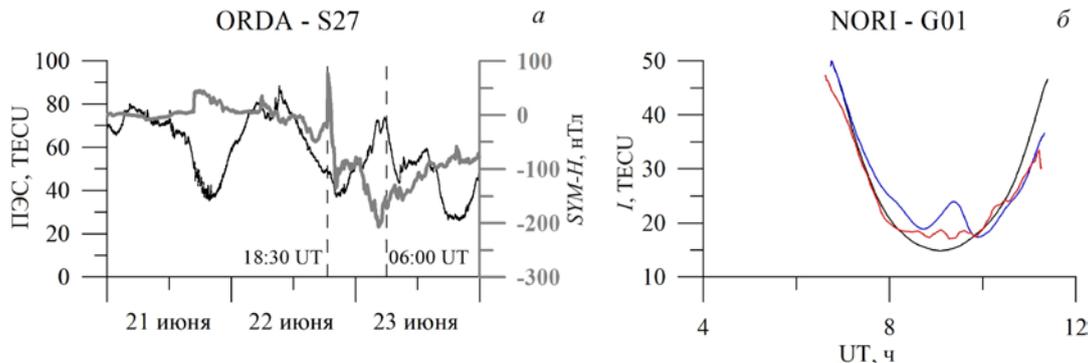


Рис. 6. Динамика ПЭС на лучах ORDA — S27 (а) и NORI — G01 (б) 21–23 июня 2015 г. На панели а штриховые линии отмечают моменты времени 18:30 UT 22 июня и 06:00 UT 23 июня; серая кривая — вариации индекса SYM-H (шкала справа). На панели б черная линия соответствует измерениям 21 июня, синяя — 22 июня, красная — 23 июня

видно усиление интенсивности вариаций ПЭС в 0–5 UT 23 июня (рис. 6, а). Данные приемника NORI (рис. 6, б) дали возможность зарегистрировать интенсивное локализованное возмущение ПЭС с амплитудой ~5 TECU 22 июня 2015 г., а также квазипериодическую долгоживущую структуру с амплитудой ~1 TECU и периодом ~30 мин 23 июня 2015 г.

4.2. Возмущенность ионосферы

Как было сказано ранее, методы оценки ионосферной возмущенности в последние годы развиваются достаточно активно. В работе [Voeykov et al.,

2016] был предложен индекс ионосферной возмущенности, представляющий собой среднее значение интенсивности колебаний ПЭС в выбранном диапазоне периодов на отдельной станции. На рис. 7 представлена динамика индекса возмущенности WTEC (синяя кривая) для колебаний с периодами до 10 мин по данным станции ORDA. Можно видеть, что после начала магнитной бури в ~18:30 UT 22 июня 2015 г. происходит значительное увеличение индекса ионосферной возмущенности — в ~8–9 раз относительно фонового уровня. Максимум WTEC совпадает по времени с минимумом SYM-H

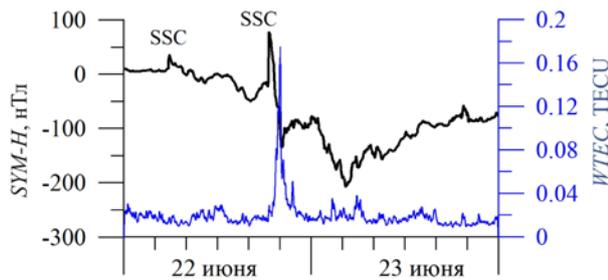


Рис. 7. Динамика индекса возмущенности *WTEC* (синяя кривая) и *SYM-H*-индекса (черная кривая) во время магнитной бури 22–23 июня 2015 г.

(черная кривая), зарегистрированным 22 июня 2015 г. После этого происходит постепенное возвращение *WTEC* к невозмущенному уровню. После начала второго этапа бури, характеризующегося падением *SYM-H* 23 июня 2015 г. и достижением глобального минимума, такого высокого уровня возмущенности ионосферы не наблюдается, хотя в целом имеет место 1.5–2-кратный рост возмущенности относительно фонового уровня.

4.3. Карты вариаций ПЭС

Сеть SibNet может предоставить информацию о пространственной структуре ионосферных возмущений за счет одновременного наблюдения на разных станциях спутников ГНСС, находящихся в различных регионах. В результате имеется значительное число лучей спутник—приемник с различной геометрией, пронизывающих ионосферу одновременно. Для автоматической обработки большого объема данных ГНСС и построения карт ПЭС в ИСЗФ СО РАН разработана система SIMuRG — System for the Ionosphere Monitoring and Researching from GNSS [<https://simurg.iszf.irk.ru>; Yasyukevich et al., 2018].

На рис. 8 представлены карты вариаций ПЭС в диапазоне периодов 2–10 мин, полученные с использованием SIMuRG для 22 июня 2015 г. Карты построены на основе данных ГНСС GPS/ГЛОНАСС/Galileo/SBAS. Можно видеть (см. рис. 8), что после начала бури в ~18:45 UT в высокоширотной области появляется отрицательное возмущение, которое постепенно распространяется на средние широты. К 20:00 UT (в дневные часы местного времени) возмущение достигает широт оз. Байкал и регистрируется там в виде интенсивных отрицательных вариаций ПЭС. Карты показывают, что ниже 50° отрицательное возмущение не распространяется.

4.4. Измерения координат

Для расчета высокоточных координат отдельной станции мы использовали программное обеспечение расчета PPP (Precise Point Position), представленное в [Zhou et al., 2018]. На рис. 9 для примера показана динамика геомагнитного индекса *SYM-H* (сплошная серая кривая) и динамика отклонений от некоторого произвольно выбранного значения координаты *Y* в системе WGS84, определяемые в двухчастотном PPP-GPS-режиме на станциях NORI и ORDA. Для среднеширотной станции ORDA, несмотря на возмущенные геомагнитные условия, резких изменений координаты с течением времени не происходит. Для

высокоширотной станции NORI 22 июня 2015 г. во время первого регистрируемого минимума *SYM-H* происходит всплеск ошибки измерения координаты. Кроме того, всплеск ошибки наблюдается для этой станции на фазе восстановления 23 июня 2015 г. Таким образом, для высоких широт высокоточные измерения координат станции могут характеризоваться ростом ошибок во время магнитных бурь.

НАПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ И ОСОБЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ

В качестве ключевых задач, которые могут решаться на развернутой сети SibNet, можно выделить следующие:

- 1) мониторинг ионосферных неоднородностей среднего и крупного масштаба, определение скорости и направления перемещения таких неоднородностей;
- 2) изучение мелкомасштабных неоднородностей и их динамики на малой базе;
- 3) изучение фазовых и амплитудных мерцаний на частотах работы ГНСС;
- 4) мониторинг и исследование ионосферной возмущенности, связанной с магнитосферной активностью;
- 5) изучение среднеширотных возмущений аврального происхождения;
- 6) изучение воздействия факторов космической погоды на характеристики радиотехнического оборудования;
- 7) контроль целостности работы навигационной системы и точности позиционирования;
- 8) геодинамические исследования в Байкальской рифтовой системе.

К особенностям сети SibNet можно отнести:

- 1) высокое временное разрешение (частота измерений до 50 Гц);
- 2) измерение сигналов независимых систем, включая GPS, ГЛОНАСС, Galileo (Beidou на одном из приемников), а также сигналов системы спутниковой поддержки SBAS;
- 3) комбинированные совместные измерения фазы, групповой псевдодальности, квадратурных компонент, а также амплитудных и фазовых мерцаний в отдельных пунктах;
- 4) развитую экспериментальную базу в регионе, существенно дополняющую проводимые измерения [Афраймович и др., 2012; Олемской, 2017].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в настоящей статье сеть SibNet наземных двухчастотных ГНСС-приемников может использоваться для широкого круга исследовательских и прикладных задач. Сеть создана в ИСЗФ СО РАН и расположена в Сибирском регионе. В настоящее время в рамках сети SibNet функционируют восемь постоянно действующих пунктов и один временный, оснащенные приемниками JAVAD GNSS, позволяющими вести мониторинг состояния ионосферы. Дополнительно функционируют три приемника NovAtel GPStation-6 для сбора данных

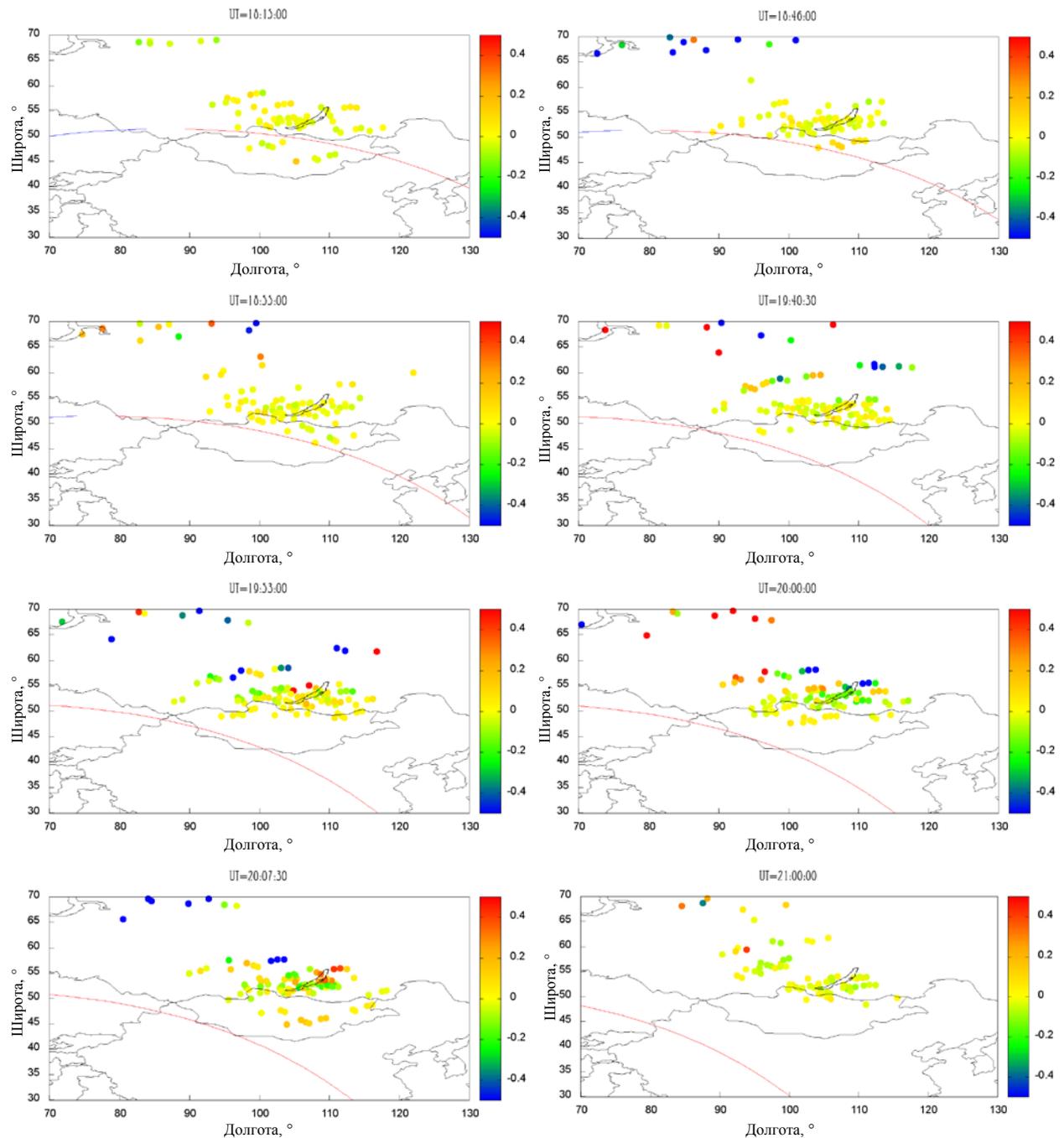


Рис. 8. Карты пространственного распределения вариаций ПЭС с периодами 2–10 мин для 22 июня 2015 г. Красная и синяя линии отмечают восходный и заходный солнечный терминаторы на высоте 300 км

об ионосферных мерцаниях. Сеть приемников SibNet входит в центр коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>] и может быть использована внешними пользователями. Ключевой проблемой на текущий момент является достижение стабильности работы всей сети без участия операторов. Новым этапом работ по развитию сети приемников является создание системы SIMuRG автоматической обработки данных ГНСС [<https://simurg.iszf.irk.ru>].

Авторы глубоко благодарны проф. Э.Л. Аффраймовичу (12.03.1940–08.11.2009) за инициацию работ по созданию сети SibNet, а также акад. Г.А. Жеребцову, чл.-корр. РАН А.П. Потехину, д.ф.-м.н. В.И. Кур-

кину, д.ф.-м.н. А.В. Медведеву за продвижение и поддержку проекта. Авторы выражают признательность А.Б. Ишину, С.В. Воейкову, И.К. Едемскому, П.В. Татаринovu, В.В. Демьянову, Е.А. Косогорову за участие в работах по организации и развертыванию сети SibNet, А.А. Перевалову за разработанное программное обеспечение, проф. В.Е. Кунцыну (24.06.1955–07.07.2015) и А.М. Падохину за консультативную помощь, В.Ф. Белкину (21.02.1939–29.11.2016), В.М. Алешкову, Д.С. Кушнареву, А.А. Луковниковой за помощь с размещением приемников ГНСС на полигонах, В.А. Санькову за совместную работу на начальных этапах размещения сети. Авторы признательны компании JAVAD

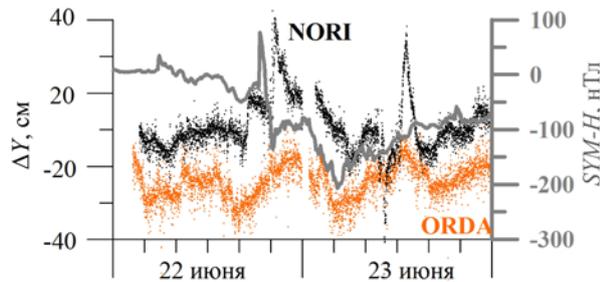


Рис. 9. Динамика отклонений координаты Y на станциях NORI (черные точки) и ORDA (оранжевые точки) 22–23 июня 2015 г. Для сравнения серой кривой приведена динамика индекса возмущенности магнитного поля $SYM-H$ (шкала справа)

GNSS и, в частности, Ю. Нужновой, С. Органову, В. Яковлеву за помощь в организации работы оборудования. Авторы благодарны OMNIWeb Plus service [<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>] за геофизические данные. Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.16 на оборудовании центра коллективного пользования «Ангара», <http://ckp-rf.ru/ckp/3056>. Обработка рядов вариаций ПЭС выполнена в рамках гранта Российского научного фонда проект № 17-77-20005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алпатов В.В., Куницын В.Е., Лапшин В.Б. и др. Опыт создания Росгидрометом сети радиотомографии для исследования и мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2012. Вып. 2. С. 60–71.
- Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы. М.: Наука, 1982. 198 с.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НИЦ ВСНЦ СО РАН, 2006. 480 с.
- Афраймович Э.Л., Жеребцов Г.А., Перевалова Н.П. и др. Сейсмоионосферные и сейсмоэлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне / отв. ред. Г.А. Жеребцов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2012. 304 с. (Интеграционные проекты СО РАН, вып. 35).
- Лухнева О.Ф., Дембелов М.Г., Лухнев А.В. Определение атмосферного влагосодержания по метеорологическим и GPS-данным // Геодинамика и тектонофизика. 2016. Т. 7, № 4. С. 545–553. DOI: [10.5800/GT-2016-7-4-0222](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222).
- Олемской С.В. Реализация проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс РАН» // Научный доклад на расширенном заседании Президиума СО РАН 21 декабря 2017 г. Available from: https://www.sbras.ru/files/files/prezidium20171221/1_olemskoy.pdf (дата обращения 1 октября 2018).
- Саньков В.А., Лухнев А.В., Мирошниченко А.И. и др. Современные горизонтальные движения и сейсмичность южной части Байкальской впадины (Байкальская рифтовая система) // Физика Земли. 2014. № 6. С. 70–79.
- Сорокин А.А., Королев С.П., Шестаков Н.В. Организация работы с данными глобальных навигационных спутниковых систем для комплексного исследования современных геодинамических процессов на юге Дальнего Востока России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 158–172. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172).
- Ясюкевич Ю.В., Мыльникова А.А., Иванов В.Б. Определение абсолютного полного электронного содержания по одночастотным спутниковым радионавигационным данным GPS/ГЛОНАСС. Солнечно-земная физика. 2017а. Т. 3, № 1. С. 97–103. DOI: [10.12737/23509](https://doi.org/10.12737/23509).
- Ясюкевич Ю.В., Оводенко В.Б., Мыльникова А.А. и др. Методы компенсации ионосферной составляющей ошибки

радиотехнических систем с применением данных полного электронного содержания GPS/ГЛОНАСС // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер. Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. 2017б. № 2 (34). С. 19–31. DOI: [10.15350/2306-2819.2017.1.19](https://doi.org/10.15350/2306-2819.2017.1.19).

Aarons J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes // J. Geophys. Res. 1997. V. 102, N A8. P. 17219–17231. DOI: [10.1029/97JA01118](https://doi.org/10.1029/97JA01118).

Afraimovich E.L., Yasukevich Yu.V. Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N. 15. P. 1949–1962. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.05.006).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., et al. Global electron content: a new conception to track solar activity // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 335–344. DOI: [10.5194/angeo-26-335-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008).

Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Demyanov V.V., et al. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena // J. Space Weather and Space Climate. 2013. V. 3. A27. DOI: [10.1051/swsc/2013049](https://doi.org/10.1051/swsc/2013049).

Arikan F., Shukurov S., Tuna H., et al. Performance of GPS slant total electron content and IRI-Plas-STECh for days with ionospheric disturbance // Geodesy and Geodynamics. 2016. V. 7, N 1. P. 1–10. DOI: [10.1016/j.geog.2015.12.009](https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.12.009).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., et al. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2017. V. 122. P. 11,716–11,742. DOI: [10.1002/2017JA024174](https://doi.org/10.1002/2017JA024174).

Bender M., Dick G., Ge M., et al. Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques // Adv. Space Res. 2011. V. 47. P. 1704–1720. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.034](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.034).

Bevis M., Businger S., Herring T.A., et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. D14. P. 15787–15801. DOI: [10.1029/92JD01517](https://doi.org/10.1029/92JD01517).

Devi M., Barbara A.K., Oyama K.-I., Chen C.-H. Earthquake induced dynamics at the ionosphere in presence of magnetic storm // Adv. Space Res. 2014. V. 53. P. 609–618. DOI: [10.1016/j.asr.2013.11.054](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.054).

Ding F., Wan W., Li Q., et al. Comparative climatological study of large-scale traveling ionospheric disturbances over North America and China in 2011–2012 // J. Geophys. Res.: Space Phys. 2014. V. 119. P. 519–529. DOI: [10.1002/2013JA019523](https://doi.org/10.1002/2013JA019523).

Dong Z., Jin S. 3-D water vapor tomography in Wuhan from GPS, BDS and GLONASS Observations // Remote Sens. 2018. V. 10, N 1. P. 62. DOI: [10.3390/rs10010062](https://doi.org/10.3390/rs10010062).

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems // J. Geodesy. 2009. V. 83. P. 191–198. DOI: [10.1007/s0019000803003](https://doi.org/10.1007/s0019000803003).

Gulyaeva T.L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 2645–2648. DOI: [10.5194/angeo-26-2645-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-2645-2008).

Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998 // J. Geodesy. 2009. V. 83, N 3–4. P. 263–275. DOI: [10.1007/s00190-008-0266-1](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1).

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Waskell E. GNSS-Global Navigation Satellite Systems, Springer, 2008. 531 p. DOI: [10.1007/978-3-211-73017-1](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1).

Jakowski N., Beniguel Y., de Franceschi G., et al. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques // J. Space Weather and Space Climate. 2012a. V. 2. A22. DOI: [10.1051/swsc/2012022](https://doi.org/10.1051/swsc/2012022).

Jakowski N., Borries C., Wilken V. Introducing a Disturbance Ionosphere Index (DIX) // Radio Sci. 2012b. V. 47, RS0L14. DOI: [10.1029/2011RS004939](https://doi.org/10.1029/2011RS004939).

- Jayachandran P.T., Langley R.B., MacDougall J.W., et al. The Canadian high arctic ionospheric network (CHAIN) // *Radio Sci.* 2009. V. 44. RS0A03. DOI: [10.1029/2008RS004046](https://doi.org/10.1029/2008RS004046).
- Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics // *Earth Sci. Rev.* 2015. V. 147. P. 54–64. DOI: [10.1016/j.earsci-rev.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2015.05.003).
- Juan J.M., Sanz J., Rovira-Garcia A., et al. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements // *J. Space Weather and Space Climate.* 2018. V. 8. A14. DOI: [10.1051/swsc/2017044](https://doi.org/10.1051/swsc/2017044).
- Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasyukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies // *Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2015. V. 12, N 3. P. 547–551. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2350037](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350037).
- Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., et al. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites // *GPS Solutions.* 2016. V. 20, N 4. P. 877–884. DOI: [10.1007/s10291-015-0500-2](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0500-2).
- Lanyi G.E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations // *Radio Sci.* 1988. V. 23, N 4. P. 483–492. DOI: [10.1029/rs023i004p00483](https://doi.org/10.1029/rs023i004p00483).
- Larson K.M., Nievinski F.G. GPS snow sensing: results from the Earth Scope Plate Boundary Observatory // *GPS Solutions.* 2013. V. 17. P. 41–52. DOI: [10.1007/s10291-012-0259-7](https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7).
- Löfgren J.S., Haas R., Johansson J.M. Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47, N 2, P. 213–220. DOI: [10.1016/j.asr.2010.08.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.015).
- Lukhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., et al. GPS rotation and strain rates in the Baikal–Mongolia region // *Russian Geology and Geophysics.* 2010. V. 51, N 7. P. 785–793. DOI: [10.1016/j.rgg.2010.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.006).
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., et al. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 3. P. 565–582. DOI: [10.1029/97RS02707](https://doi.org/10.1029/97RS02707).
- Mazzotti S., Dragert H., Henton J., et al. Current tectonics of northern Cascadia from a decade of GPS measurements // *J. Geophys. Res.* 2003. V. 108, N B12. 2554. DOI: [10.1029/2003JB002653](https://doi.org/10.1029/2003JB002653).
- Mitchell C.N., Spencer P.S.J. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS // *Ann. Geophys.* 2003. V. 46, N 4. P. 687–696. DOI: [10.4401/ag-4373](https://doi.org/10.4401/ag-4373).
- Mitchell C.N., Alfonsi L., de Franceschi G., et al. GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32. L12S03. DOI: [10.1029/2004GL021644](https://doi.org/10.1029/2004GL021644).
- Nesterov I.A., Kunitsyn V.E. GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essentially incomplete data // *Adv. Space Res.* 2011. V. 47, N 10. P. 1789–1803. DOI: [10.1016/j.asr.2010.11.034](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.034).
- Nesterov I.A., Andreeva E.S., Padokhin A.M., et al. Ionospheric perturbation indices based on the low- and high-orbiting satellite radio tomography data // *GPS Solutions.* 2017. V. 21, N4. P. 1679–1694. DOI: [10.1007/s10291-017-0646-1](https://doi.org/10.1007/s10291-017-0646-1).
- Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., et al. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe // *Ann. Geophys.* 2013. V. 31, N 2. P. 163–172. DOI: [10.5194/angeo-31-163-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013).
- Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results // *Adv. Space Res.* 2015. V. 56, N 5. P. 900–906. DOI: [10.1016/j.asr.2015.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.017).
- Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Andreeva E.S., et al. Estimation of sea level variations with GPS/GLONASS-reflectometry technique // *Proc. Of SPIE.* 2017. V. 104667J: 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. DOI: [10.1117/12.2288741](https://doi.org/10.1117/12.2288741).
- Perevalova N.P., Shestakov N.V., Voeykov S.V., et al. Ionospheric disturbances in the vicinity of the Chelyabinsk meteoroid explosive disruption as inferred from dense GPS observations // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42. P. 6535–6543. DOI: [10.1002/2015GL064792](https://doi.org/10.1002/2015GL064792).
- Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPSnetwork // *Geophys. Res. Lett.* 1997. V. 24. P. 2283–2286. DOI: [10.1029/97GL02273](https://doi.org/10.1029/97GL02273).
- Priego E., Jones J., Porres M.J., Seco A. Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish Mediterranean area // *Geomatics, Natural Hazards and Risk.* 2017. V. 8, N 2. P. 282–294. DOI: [10.1080/19475705.2016.1201150](https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1201150).
- Ruffini G., Flores A., Rius A. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1998. V. 36, N 1. P. 143–153. DOI: [10.1109/36.655324](https://doi.org/10.1109/36.655324).
- Segall P., Davis J.L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.* 1997. V. 25. P. 301–336. DOI: [10.1146/annurev.earth.25.1.301](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301).
- Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere // *Proc. IGS AC Workshop, Darmstadt, Germany, February 9–11, 1998.* P. 307–320.
- Schunk R.W., Scherliess L., Sojka J.J., Thompson D. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) // *Radio Sci.* 2004. V. 39, RS1S02. DOI: [10.1029/2002RS002794](https://doi.org/10.1029/2002RS002794).
- Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., van Dierendonck A.J. Evolution to modernized GNSS ionospheric scintillation and TEC monitoring // *IEEE/ION PLANS 2012 – April 24–26, Myrtle Beach, SC, Session B2A.* 2012. Available from: <http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/PID2363033.pdf> (дата обращения 1 октября 2018).
- Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., et al. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations // *Geophys. J. Intern.* 2011. V. 184, N 2. P. 529–540. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x).
- Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., et al. Ionosphere state and parameter estimation using the ensemble square root filter and the global three-dimensional first-principle model // *Space Weather.* 2012. V. 10. S07004. DOI: [10.1029/2012SW000777](https://doi.org/10.1029/2012SW000777).
- Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., et al. Total electron content observations by dense regional and worldwide international networks of GNSS // *J. Disaster Res.* 2018. V. 13, N 3. P. 535–545. DOI: [10.20965/jdr.2018.p0535](https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0535).
- Voeykov S.V., Bergardt O.I., Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite // *Geomagnetism and Aeronomy.* 2016. V. 56, N 2. P. 219–228. DOI: [10.1134/S0016793216020122](https://doi.org/10.1134/S0016793216020122).
- Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V., Kiselev A.V., et al. Tool for creating maps of GNSS total electron content // *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium, Toyama, Japan, 1–4 August 2018.* 180330063056.
- Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillation in the ionosphere // *Proc. of IEEE.* 1982. V. 70, N 4. P. 324–360. DOI: [10.1109/PROC.1982.12313](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313).
- Zhou F., Dong D., Li W., et al. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations // *GPS Solutions.* 2018. V. 22. 33. DOI: [10.1007/s10291-018-0699-9](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0699-9).
- Zolesi B., Belehaki A., Tsagouri I., Cander Lj.R. Real-time updating of the Simplified Ionospheric Regional Model for operational applications // *Radio Sci.* 2004. V. 39, N 2. RS2011. DOI: [10.1029/2003RS002936](https://doi.org/10.1029/2003RS002936).
URL: <http://www.unavco.org> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <ftp://terras.gsi.go.jp/data> (дата обращения 1 октября 2018).

- URL: <ftp://nfs.kasi.re.kr/gps/data/daily> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <ftp://ftp.sonel.org/gps/data> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <ftp://ftp.trignet.co.za> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <https://hive.geosystems.aero> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <http://smarnet-ru.com> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <https://eft-cors.ru> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <http://rtknet.ru> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <https://simurg.iszf.irk.ru> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (дата обращения 1 октября 2018).
- URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 1 октября 2018).

REFERENCES

- Aarons J. Global positioning system phase fluctuations at auroral latitudes. *J. Geophys. Res.* 1997, vol. 102, A8, pp. 17219–17231. DOI: [10.1029/97JA01118](https://doi.org/10.1029/97JA01118).
- Afraimovich E.L. *Interferentsionnye metody zondirovaniya ionosfery* [Interferometry techniques for ionospheric radiosensing]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 198 p. (In Russian).
- Afraimovich E.L., Perevalova N.P. *GPS monitoring verkhnei atmosfery Zemli* [GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, SC RRS SB RAMS Publ., 2006, 480 p. (In Russian).
- Afraimovich E.L., Yasukevich Yu.V. Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 15, pp. 1949–1962. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.05.006](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.05.006).
- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Oinats A.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Global electron content: a new conception to track solar activity. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 335–344. DOI: [10.5194/angeo-26-335-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-335-2008).
- Afraimovich E.L., Zherebtsov G.A., Perevalova N.P., Sankov V.A., Bashkuyev Yu.B., Kurkin V.I., Kovalenko V.A., Rakhmatulin R.A., Mikhalev A.V., Bergardt O.I., Aleshkov V.M., Lipko Yu.V., Pirog O.M., Polekh N.M., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Ishin A.B., Edemskiy I.K., Podlesny A.V., Brynko I.G., Pashinin A.Yu., Molodykh S.I., Ivanova V.A., Astafyeva E.I., Polyakova A.S., Likhnev A.V., Likhneva O.F., Ashurkov S.V., Dobrynya A.A., Byzov L.M., Miroshnichenko A.I., Chernykh E.N., Dembelov M.G., Buyanova D.G., Naguslaeva I.B., Khaptanov V.B., Angarkhaeva L.Kh., Advokatov V.R., Balkhanov V.K., Ayurov D.B., Khomutov S.Yu., Zhivetiev I.V. *Seismo-ionosfernyye i seismoelectromagnitnyye protsessy v Baykalskoi riftovoi zone* [Seismoionospheric and Seismoelectromagnetic Processes in the Baikal Rift Zone]. Ed. G.A. Zherebtsov. Novosibirsk, SO RAN Publ., 2012. (In Russian).
- Afraimovich E.L., Astafyeva E.I., Dem'yanov V.V., Edemskiy I.K., Gavriluk N.S., Ishin A.B., Kosogorov E.A., Leonovich L.A., Lesyuta O.S., Palamartchouk K.S., Perevalova N.P., Polyakova A.S., Smolkov G.Y., Voeykov S.V., Yasukevich Yu.V., Zhivetiev I.V. Review of GPS/GLONASS studies of the ionospheric response to natural and anthropogenic processes and phenomena. *J. Space Weather and Space Climate.* 2013, vol. 3, A27. DOI: [10.1051/swsc/2013049](https://doi.org/10.1051/swsc/2013049).
- Alpatov V.V., Kunitsyn V.E., Lapshin V.B., Romanov A.A., Tsenko S.V. Experience of creation by Roshydromet of radiotomography network for the ionosphere research and monitoring. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophys. Res.]. 2012, iss. 2. pp. 60–71. (In Russian).
- Arikan F., Shukurov S., Tuna H., Arikan O., Gulyaeva T.L. Performance of GPS slant total electron content and IRI-Plas-

STEC for days with ionospheric disturbance. *Geodesy and Geodynamics.* 2016, vol. 7, no. 1, pp. 1–10. DOI: [10.1016/j.geog.2015.12.009](https://doi.org/10.1016/j.geog.2015.12.009).

Astafyeva E., Zakharenkova I., Huba J.D., Doornbos E., van den IJssel J. Global Ionospheric and thermospheric effects of the June 2015 geomagnetic disturbances: Multi-instrumental observations and modeling. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2017, vol. 122, pp. 11,716–11,742. DOI: [10.1002/2017JA024174](https://doi.org/10.1002/2017JA024174).

Bender M., Dick G., Ge M., Deng Z., Wickert J., Kahle H.-G., Raabe A., Tetzlaff G. Development of a GNSS water vapour tomography system using algebraic reconstruction techniques. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, pp. 1704–1720. DOI: [10.1016/j.asr.2010.05.034](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.05.034).

Bevis M., Businger S., Herring T.A., Rocken C., Anthes R.A., Ware R.H. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.* 1992, vol. 97, D14, pp. 15787–15801. DOI: [10.1029/92JD01517](https://doi.org/10.1029/92JD01517).

Devi M., Barbara A.K., Oyama K.-I., Chen C.-H. Earthquake induced dynamics at the ionosphere in presence of magnetic storm. *Adv. Space Res.* 2014, vol. 53, pp. 609–618. DOI: [10.1016/j.asr.2013.11.054](https://doi.org/10.1016/j.asr.2013.11.054).

Ding F., Wan W., Li Q., Zhang R., Song Q., Ning B., Liu L., Zhao B., Xiong B. Comparative climatological study of large-scale traveling ionospheric disturbances over North America and China in 2011–2012. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2014, vol. 119, pp. 519–529. DOI: [10.1002/2013JA019523](https://doi.org/10.1002/2013JA019523).

Dong Z., Jin S. 3-D water vapor tomography in Wuhan from GPS, BDS and GLONASS observations. *Remote Sens.* 2018, vol. 10, no. 1, 62. DOI: [10.3390/rs10010062](https://doi.org/10.3390/rs10010062).

Dow J.M., Neilan R.E., Rizos C. The International GNSS Service in a changing landscape of Global Navigation Satellite Systems. *J. Geodesy.* 2009, vol. 83, pp. 191–198. DOI: [10.1007/s0019000803003](https://doi.org/10.1007/s0019000803003).

Gulyaeva T.L., Stanislawski I. Derivation of a planetary ionospheric storm index. *Ann. Geophys.* 2008, vol. 26, pp. 2645–2648. DOI: [10.5194/angeo-26-2645-2008](https://doi.org/10.5194/angeo-26-2645-2008).

Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., Orus R., Garcia-Rigo A., Felzens J., Komjathy A., Schaer S.C., Krankowski A. The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998. *J. Geodesy.* 2009, vol. 83, no. 3–4. pp. 263–275. DOI: [10.1007/s00190-008-0266-1](https://doi.org/10.1007/s00190-008-0266-1).

Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. *GNSS-Global Navigation Satellite Systems*. Springer, 2008. 531 p. DOI: [10.1007/978-3-211-73017-1](https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1).

Jakowski N., Beniguel Y., De Franceschi G., Pajares M.H., Jacobsen K.S., Stanislawski I., Tomasik L., Warnant R., Wautelet G. Monitoring, tracking and forecasting ionospheric perturbations using GNSS techniques. *J. Space Weather and Space Climate.* 2012a, vol. 2, A22. DOI: [10.1051/swsc/2012022](https://doi.org/10.1051/swsc/2012022).

Jakowski N., Borries C., Wilken V. Introducing a Disturbance Ionosphere Index (DIX). *Radio Sci.* 2012b, vol. 47, RS0L14. DOI: [10.1029/2011RS004939](https://doi.org/10.1029/2011RS004939).

Jayachandran P.T., Langley R.B., MacDougall J.W., Mushini S.C., Pokhotelov D., Hamza A.M., Mann I.R., Milling D.K., Kale Z.C., Chadwick R., Kelly T., Danskin D.W., Carrano C.S. The Canadian high arctic ionospheric network (CHAIN). *Radio Sci.* 2009, vol. 44, RS0A03. DOI: [10.1029/2008RS004046](https://doi.org/10.1029/2008RS004046).

Jin S., Occhipinti G., Jin R. GNSS ionospheric seismology: Recent observation evidences and characteristics. *Earth Sci. Rev.* 2015, vol. 147, pp. 54–64. DOI: [10.1016/j.earscirev.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.05.003).

Juan J.M., Sanz J., Rovira-Garcia A., González-Casado G., Ibáñez D., Perez R.O. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements. *J. Space Weather and Space Climate.* 2018, vol. 8, A14. DOI: [10.1051/swsc/2017044](https://doi.org/10.1051/swsc/2017044).

Kunitsyn V., Kurbatov G., Yasukevich Yu., Padokhin A. Investigation of SBAS L1/L5 signals and their application to the ionospheric TEC studies. *Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2015, vol. 12, no. 3, pp. 547–551. DOI: [10.1109/LGRS.2014.2350037](https://doi.org/10.1109/LGRS.2014.2350037).

- Kunitsyn V.E., Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Yasyukevich Yu.V., Morozov Yu.V. Ionospheric TEC estimation with the signals of various geostationary navigational satellites. *GPS Solutions*. 2016, vol. 20, no. 4, pp. 877–884. DOI: [10.1007/s10291-015-0500-2](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0500-2).
- Lanyi G.E., Roth T. A comparison of mapped and measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellite observations. *Radio Sci.* 1988, vol. 23, no. 4, pp. 483–492. DOI: [10.1029/rs023i004p00483](https://doi.org/10.1029/rs023i004p00483).
- Larson K.M., Nievinski F.G. GPS snow sensing: results from the EarthScope Plate Boundary Observatory. *GPS Solutions*. 2013, vol. 17, pp. 41–52. DOI: [10.1007/s10291-012-0259-7](https://doi.org/10.1007/s10291-012-0259-7).
- Löfgren J.S., Haas R., Johansson J.M. Monitoring coastal sea level using reflected GNSS signals. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, no. 2, pp. 213–220. DOI: [10.1016/j.asr.2010.08.015](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.08.015).
- Lukhnev A.V., San'kov V.A., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., Calais E. GPS rotation and strain rates in the Baikal–Mongolia region. *Russian Geology and Geophysics*. 2010, vol. 51, no. 7, pp. 785–793. DOI: [10.1016/j.rgg.2010.06.006](https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.006).
- Lukhneva O.F., Dembelov M.G., Lukhnev A.V. Determination of atmospheric water content from meteorological and GPS data. *Geodinamika i tektonofizika* [Geodynamics & Tectonophysics]. 2016, vol. 7, no. 4, pp. 545–553. DOI: [10.5800/GT-2016-7-4-0222](https://doi.org/10.5800/GT-2016-7-4-0222). (In Russian).
- Mannucci A.J., Wilson B.D., Yuan D.N., Ho C.M., Lindqwister U.J., Runge T.F. A global mapping technique for GPS-derived ionospheric TEC measurements. *Radio Sci.* 1998, vol. 33, no. 3, pp. 565–582. DOI: [10.1029/97RS02707](https://doi.org/10.1029/97RS02707).
- Mazzotti S., Dragert H., Henton J., Schmidt M., Hyndman R., James T., Lu Y., Craymer M. Current tectonics of northern Cascadia from a decade of GPS measurements. *J. Geophys. Res.* 2003, vol. 108, no. B12, 2554. DOI: [10.1029/2003JB002653](https://doi.org/10.1029/2003JB002653).
- Mitchell C.N., Spencer P.S.J. A three-dimensional time-dependent algorithm for ionospheric imaging using GPS. *Ann. Geophys.* 2003, vol. 46, no. 4, pp. 687–696. DOI: [10.4401/ag-4373](https://doi.org/10.4401/ag-4373).
- Mitchell C.N., Alfonsi L., De Franceschi G., Lester M., Romano V., Wernik A.W. GPS TEC and scintillation measurements from the polar ionosphere during the October 2003 storm. *Geophys Res Lett.* 2005, vol. 32, L12S03. DOI: [10.1029/2004GL021644](https://doi.org/10.1029/2004GL021644).
- Nesterov I.A., Kunitsyn V.E. GNSS radio tomography of the ionosphere: The problem with essentially incomplete data. *Adv. Space Res.* 2011, vol. 47, no. 10, pp. 1789–1803. DOI: [10.1016/j.asr.2010.11.034](https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.11.034).
- Nesterov I.A., Andreeva E.S., Padokhin A.M., Tumanova Yu.S., Nazarenko M.O. Ionospheric perturbation indices based on the low- and high-orbiting satellite radio tomography data. *GPS Solutions*. 2017, vol. 21, no. 4, pp. 1679–1694. DOI: [10.1007/s10291-017-0646-1](https://doi.org/10.1007/s10291-017-0646-1).
- Olemskoy S.V. Implementating the project «National Helio-geophysical Center of RAS» project development. Scientific report at Extended Meeting of SB RAS Presidium on December 21, 2017. Available from: https://www.sbras.ru/files/files/prezidium20171221/1_olemskoy.pdf (accessed October 1, 2018). [In Russian].
- Otsuka Y., Suzuki K., Nakagawa S., Nishioka M., Shiokawa K., Tsugawa T. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Ann. Geophys.* 2013, vol. 31, no. 2, pp. 163–172. DOI: [10.5194/angeo-31-163-2013](https://doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013).
- Ovodenko V.B., Trekin V.V., Korenkova N.A., Klimenko M.V. Investigating range error compensation in UHF radar through IRI-2007 real-time updating: Preliminary results. *Adv. Space Res.* 2015, vol. 56, no. 5, pp. 900–906. DOI: [10.1016/j.asr.2015.05.017](https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.05.017).
- Padokhin A.M., Kurbatov G.A., Andreeva E.S., Nesterov I.A., Nazarenko M.O., Berbeneva N.A., Karlysheva A.V. Estimation of sea level variations with GPS/GLONASS-reflectometry technique. *Proc. of PIE*. 2017, vol. 104667J: 23rd International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. DOI: [10.1117/12.2288741](https://doi.org/10.1117/12.2288741).
- Perevalova N.P., Shestakov N.V., Voeykov S.V., Takahashi H., Guojie M. Ionospheric disturbances in the vicinity of the Chelyabinsk meteoroid explosive disruption as inferred from dense GPS observations. *Geophys. Res. Lett.* 2015, vol. 42, pp. 6535–6543. DOI: [10.1002/2015GL064792](https://doi.org/10.1002/2015GL064792).
- Pi X., Mannucci A.J., Lindqwister U.J., Ho C.M. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, pp. 2283–2286. DOI: [10.1029/97GL02273](https://doi.org/10.1029/97GL02273).
- Priego E., Jones J., Porres M.J., Seco A. Monitoring water vapour with GNSS during a heavy rainfall event in the Spanish Mediterranean area, Geomatics. *Natural Hazards and Risk*. 2017, vol. 8, no. 2, pp. 282–294. DOI: [10.1080/19475705.2016.1201150](https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1201150).
- Ruffini G., Flores A., Rius A. GPS tomography of the ionospheric electron content with a correlation functional. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 1998, vol. 36, no. 1, pp. 143–153. DOI: [10.1109/36.655324](https://doi.org/10.1109/36.655324).
- Sankov V.A., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Dobrynina A.A., Ashurkov S.V., Byzov L.M., Dembelov M.G., Calais E., Déverchère J. Contemporary horizontal movements and seismicity of the south Baikal basin (Baikal rift system). *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2014, vol. 50, no. 6, pp. 785–794. DOI: [10.1134/S106935131406007X](https://doi.org/10.1134/S106935131406007X).
- Segall P., Davis J.L. GPS applications for geodynamics and earthquake studies. *Ann. Rev. Earth and Planetary Sci.* 1997, vol. 25, pp. 301–336. DOI: [10.1146/annurev.earth.25.1.301](https://doi.org/10.1146/annurev.earth.25.1.301).
- Schaer S., Beutler G., Rothacher M. Mapping and predicting the ionosphere. *Proc. IGS AC Workshop*, Darmstadt, Germany, February 9–11, 1998, pp. 307–320.
- Schunk R.W., Scherliess L., Sojka J.J., Thompson D. Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM). *Radio Sci.* 2004, vol. 39, RS1S02. DOI: [10.1029/2002RS002794](https://doi.org/10.1029/2002RS002794).
- Shanmugam S., Jones J., MacAulay A., van Dierendonck A.J. Evolution to Modernized GNSS Ionospheric Scintillation and TEC Monitoring. *IEEE/ION PLANS 2012* — April 24–26, Myrtle Beach, SC, Session B2A. 2012. Available from: <http://www.novatel.com/assets/Documents/Papers/PID2363033.pdf> (accessed October 1, 2018).
- Shestakov N.V., Gerasimenko M.D., Takahashi H., Kasahara M., Bormotov V.A., Bykov V.G., Kolomiets A.G., Gerasimov G.N., Vasilenko N.F., Prytkov A.S. Present tectonics of the southeast of Russia as seen from GPS observations. *Geophys. J. International*. 2011, vol. 184, no. 2, pp. 529–540. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04871.x).
- Solomentsev D., Khattatov B., Codrescu M., Titov A., Yudin V., Khattatov V., Ionosphere state and parameter estimation using the Ensemble Square Root Filter and the global three-dimensional first-principle model. *Space Weather*. 2012, vol. 10, S07004. DOI: [10.1029/2012SW000777](https://doi.org/10.1029/2012SW000777).
- Sorokin A.A., Korolev S.P., Shestakov N.V., Malkovsky S.I., Tsoy G.I., Pupatenko V.V. Work administration with Global Navigation Satellite System data for complex study of modern geodynamic processes in the south of Far East of Russia. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space]. 2017, vol. 14, no. 3, pp. 158–172. DOI: [10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172](https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-158-172). (In Russian).
- Tsugawa T., Nishioka M., Ishii M., Hozumi K., Saito S., Shinbori A., Otsuka Y., Saito A., Buhari S., Abdullah M., Supnithi P. Total Electron Content Observations by Dense Regional and Worldwide International Networks of GNSS. *J. Disaster Res.* 2018, vol. 13, no. 3, pp. 535–545. DOI: [10.20965/jdr.2018.p0535](https://doi.org/10.20965/jdr.2018.p0535).
- Voeykov S.V., Berngardt O.I., Shestakov N.V. Use of the index of TEC vertical variation disturbance in studying ionospheric effects of the Chelyabinsk meteorite. *Geomagnetism and Aeronomy*. 2016, vol. 56, no. 2, pp. 219–228. DOI: [10.1134/S0016793216020122](https://doi.org/10.1134/S0016793216020122).

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Ivanov V.B. Estimating the absolute total electron content based on single-frequency satellite radio navigation GPS/GLONASS data. *Solar-Terr. Phys.* 2017a, vol. 3, no. 1, pp. 128–137. DOI: [10.12737/article_58f972906c64a5.33470182](https://doi.org/10.12737/article_58f972906c64a5.33470182).

Yasyukevich Yu.V., Ovodenko V.B., Mylnikova A.A., Zhivetiev I.V., Vesnin A.M., Edemskiy I.K., Kotova D.S. Methods of compensation of ionospheric component error of radio communication systems using GPS/GLONASS total electron content data. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Bull. of Volga State University of Technology. Ser. Radio Engineering and Information Systems]. 2017b, vol. 2, no. 34, pp. 19–31. DOI: [10.15350/2306-2819.2017.2.19](https://doi.org/10.15350/2306-2819.2017.2.19). (In Russian.)

Yasyukevich Yu.V., Zhivetiev I.V., Kiselev A.V., Edemskiy I.K., Syrovatsky S.V., Shabalin A.S., Vesnin A.M. Tool for Creating Maps of GNSS Total Electron Content. *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium*. Toyama, Japan, 1–4 August, 2018, 180330063056.

Yeh K.C., Liu C.H. Radio wave scintillation in the ionosphere. *Proc. of IEEE*. 1982, vol. 70, no. 4, pp. 324–360. DOI: [10.1109/PROC.1982.12313](https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12313).

Zhou F., Dong D., Li W., Jiang X., Wickert J., Schuh H. GAMP: An open-source software of multi-GNSS precise point positioning using undifferenced and uncombined observations. *GPS Solutions*. 2018, vol. 22, 33. DOI: [10.1007/s10291-018-0699-9](https://doi.org/10.1007/s10291-018-0699-9).

Zolesi B., Belehaki A., Tsagouri I., Cander Lj.R. Real-time updating of the Simplified Ionospheric Regional Model for operational applications. *Radio Sci.* 2004, vol. 39, no. 2. RS2011. DOI: [10.1029/2003RS002936](https://doi.org/10.1029/2003RS002936).

URL: <http://www.unavco.org> (accessed October 1, 2018).

URL: <ftp://terras.gsi.go.jp/data> (accessed October 1, 2018).

URL: <ftp://nfs.kasi.re.kr/gps/data/daily> (accessed October 1, 2018).

URL: <ftp://ftp.sonel.org/gps/data> (accessed October 1, 2018).

URL: <ftp://ftp.trignet.co.za> (accessed October 1, 2018).

URL: <https://hive.geosystems.aero> (accessed October 1, 2018).

URL: <http://smartnet-ru.com> (accessed October 1, 2018).

URL: <https://eft-cors.ru> (accessed October 1, 2018).

URL: <http://rtknet.ru> (accessed October 1, 2018).

URL: <https://simurg.iszf.irk.ru> (accessed October 1, 2018).

URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056> (accessed October 1, 2018).

URL: <http://omniweb.gsfc.nasa.gov> (accessed October 1, 2018).

Как цитировать эту статью

Ясюкевич Ю.В., Веснин А.М., Перевалова Н.П. Сибирская сеть приемников сигналов глобальных навигационных спутниковых систем SibNet: текущее состояние. *Солнечно-земная физика*. 2018. Т. 4, № 4. С. 82–94. DOI: [10.12737/szf-44201809](https://doi.org/10.12737/szf-44201809).