

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.7>

УДК: 550.388.2

ОСОБЕННОСТИ ОПИСАНИЯ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВЫСОКИХ ШИРОТ С ПОМОЩЬЮ ROTI ИНДЕКСА ПО ДАННЫМ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ GPS И TRANSIT/ПАРУС

А.М. Падохин^{1,2,3}, Е.С. Андреева¹, М.О. Назаренко¹,
А.В. Карлышева¹, И.А. Павлов^{1,2,3}, Г.А. Курбатов¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

² Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.
Пушкова РАН

108840, г. Троицк, Калужское шоссе, д. 4

³ Институт солнечно-земной физики СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126А, а/я 291

Статья поступила в редакцию 17 мая 2024 г.

Аннотация. В работе приводится сопоставление возможностей описания ионосферных неоднородностей высоких широт с характерными горизонтальными масштабами несколько десятков километров на основе ROTI индекса, построенного по данным радиопросвечивания сигналами GPS и Парус/Transit. Показано, что если в случае с GPS максимальные значения ROTI наблюдаются в областях аврорального овала и полярной шапки, то для Парус/Transit присутствует дополнительная область, связанная с ракурсным усилением флуктуаций фазы и TEC при наблюдении в направлении магнитного зенита. Такие отличия связаны с наклонами орбит низкоорбитальных (Парус/Transit) и среднеорбитальных (GPS) спутников, последние из которых не позволяют эффективно просвечивать область магнитного зенита для приемников, расположенных в высоких широтах. Кроме того, наблюдаются значительные, до 2х раз, отличия в значениях ROTI индекса по данным GPS и

Парус/Transit, что связано с различными скоростями движения подионосферных точек спутников и их отношением к скорости дрейфа плазмы в высоких широтах, что может приводить к рассогласованию характерных горизонтальных масштабов неоднородностей, к которым ROTI индекс демонстрирует максимальную чувствительность.

Ключевые слова: ионосфера, неоднородности, GPS, Парус, Transit, TEC, ROTI.

Финансирование: Российский научный фонд проект № 23-17-00157.

Автор для переписки: Падохин Артем Михайлович, padokhin@physics.msu.ru

Введение

Основные морфологические особенности ионосферы высоких широт, прежде всего главный и высокоширотный провалы, а также авроральный овал и связанный с ним овал ионосферных неоднородностей, играют ключевую роль для надежности функционирования радиотехнических систем, использующих трансionoсферный радиоканал в арктическом регионе. Среди таких критически важных систем в первую очередь необходимо отметить системы глобальной спутниковой навигации GNSS, работающие в гигагерцовом диапазоне, а также системы КВ-связи, являющиеся основным или резервным каналом связи в арктическом регионе, например для гражданской авиации.

Средне- и мелкомасштабные ионосферные неоднородности в высоких широтах образуются вследствие комплекса процессов, связанных с возникновением и распадом неустойчивостей ионосферной плазмы различных пространственно-временных масштабов, в частности, в областях высоких градиентов электронной концентрации на стенках ионосферного провала и плазменных структур ионосферной конвекции, в связи с высыпаниями высокоэнергетических авроральных частиц [1-3]. Исследования ионосферных неоднородностей в высокоширотной F-области проводятся достаточно давно с использованием различных методов и наземных инструментов. Большой массив важной информации о параметрах средне- и мелкомасштабных

ионосферных неоднородностей был получен с применением метода радиопросвечивания ионосферы сигналами низкоорбитальных спутниковых радиомаяков Transit/Парус [4, 5]. С развитием спутникового и наземного сегментов глобальных спутниковых навигационных систем GNSS исследованиям ионосферных неоднородностей высоких широт методом радиопросвечивания стало уделяться все больше внимания. Это связано в первую очередь с тем, что интенсивные ионосферные неоднородности, прежде всего мелкомасштабные, вызывают интенсивные мерцания амплитуды и флуктуации фазы навигационных сигналов, что приводит к срывам сопровождения фазы (cycle slips) и, как следствие, ухудшению точности навигации [6]. С другой стороны, сами характеристики амплитудных мерцаний и фазовых флуктуаций несут информацию о ионосферных неоднородностях, что, учитывая сравнительно небольшую стоимость GNSS приемников, открыло широкие возможности для исследований. Для количественного описания ионосферных неоднородностей различных масштабов по данным GNSS были предложены различные индексы возмущенности, основанные на скорости изменения интегральной характеристики – полного электронном содержании (TEC – total electron content, число электронов в столбе ионосферы с единичным сечением) – как мере фазовых флуктуаций, например ROTI [7], AATR [8] и др. Данные индексы в настоящее время широко применяются в системах мониторинга космической погоды. Вместе с тем оценки TEC методом радиопросвечивания, а следовательно, и исходные данные для построения ROTI-подобных индексов, можно получать не только с помощью приема сигналов среднеорбитальных спутников GNSS. Так, например, в работах [9, 10] для исследования характеристик экваториальных плазменных пузырей использовался ROTI индекс, построенный на основе приема сигналов геостационарных спутников системы Beidou. В связи с этим целью данной работы является анализ данных ROTI, построенных на основе радиопросвечивания сигналами низкоорбитальных навигационных спутников Парус/Transit и сопоставление их информативности в описании ионосферных

неоднородностей высоких широт с оценками ROTI, полученными по данным GPS. Данное исследование представляется актуальным в связи с планируемыми запусками низкоорбитальных спутников серии Ионосфера-М и низкоорбитального сегмента китайской навигационной системы Beidou.

1. ROTI индекс по данным навигационных систем GPS и Парус/Transit

Теоретические и экспериментальные исследования распространения радиоволн в случайно неоднородной ионосфере и спектра ионосферных мерцаний [11, 12] показали, что флуктуации фазы радиосигнала с частотами много меньше частоты Френеля вызываются ионосферными неоднородностями с характерными масштабами много большими, чем размер первой зоны Френеля. В таких условиях распространение радиосигнала можно рассматривать в рамках приближения геометрической оптики и наблюдаемые флуктуации фазы определяются эффектами рефракции. Напротив, когда характерный масштаб неоднородностей сравним или меньше размера первой зоны Френеля, эффекты дифракции и рассеяния могут вызывать мерцания амплитуды и флуктуации фазы с частотами, превышающими частоту Френеля.

Для спутников GPS, движущихся по средним круговым орбитам с высотой ~ 20200 км и периодом 12 ч, и передающих сигналы на когерентных частотах L диапазона (1.57542 ГГц и 1.2276 ГГц), размер первой зоны Френеля для сигнала на второй частоте при наблюдении в зените варьируется в пределах от ~ 155 м до ~ 310 м для высот E (~ 100 км) и F (~ 400 км) областей ионосферы, соответственно. Скорость движения подионосферной точки (точки пересечения луча спутник-приемник со слоем ионосферы на заданной высоте) при этом составляет ~ 20 м/с и ~ 80 м/с, соответственно. При этом скорость подионосферной точки уменьшается с приближением к максимальному углу возвышения спутника.

Для спутников Парус/Transit, движущихся по низким круговым орбитам с высотой ~ 1100 км и периодом ~ 106 мин, и передающих когерентные сигналы в VHF/UHF диапазонах (150 МГц и 400 МГц), размер первой зоны Френеля для

сигнала на первой частоте при наблюдении в зените изменяется в пределах от ~ 425 м до ~ 715 м для E и F слоев ионосферы, соответственно. Скорость движения подионосферных точек спутников Парус/Transit при этом составляет ~ 660 м/с и ~ 2.65 км/с, соответственно.

Таким образом, видно, что характерный масштаб неоднородностей, разделяющий области проявления дифракционных и рефракционных эффектов, при радиопросвечивании ионосферы сигналами GPS и Transit/Парус хоть и отличается практически в 2.5 раза, но является величиной одного порядка (несколько сотен метров). Несколько иначе обстоит дело с частотой Френеля $f_F = v/R_F \sqrt{2}$, где R_F – размер первой зоны Френеля, а v – относительная горизонтальная скорость движения подионосферной точки и ионосферной плазмы. Если рассматривать неподвижные неоднородности, то для спутников GPS она лежит в диапазоне от 0.09 Гц до 0.183 Гц, а для спутников Парус/Transit в диапазоне 1.1 Гц – 2.62 Гц, что дает представление о частотах, на которых полученные фазовые флуктуации можно рассматривать в приближении геометрической оптики. Однако, в условиях высоких широт скорость дрейфа плазмы может быть достаточно велика, порядка 1 км/с (много больше скорости движения подионосферной точки GPS и меньше или порядка скорости движения подионосферной точки Парус/Transit), соответственно частоты Френеля будут достаточно высоки, как для GPS, так и для Парус/Transit, чтобы считать, что наблюдаемые низкочастотные вариации фазы вызваны изменениями электронной концентрации вдоль луча спутник-приемник или изменением TEC. TEC вдоль луча спутник-приемник может быть в таком случае определен по комбинации фазовых наблюдений L_i, L_j на двух когерентных рабочих частотах f_i, f_j [13]:

$$TEC = \frac{c}{K} \left(\frac{L_i}{f_i} - \frac{L_j}{f_j} \right) \frac{f_i^2 f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} + const, \quad (1)$$

где c – скорость света в вакууме, $K = 40.308 \text{ м}^3/\text{с}^2$. Отметим, что оценка (1) является относительной, т.е. содержит аддитивную константу, связанную с неопределенностью начальной фазы. В качестве единицы измерения TEC

обычно принимают $1\text{TECu} = 10^{16}$ электронов/м². На основе оценки ТЕС согласно (1) в свою очередь может быть оценена скорость изменения ТЕС для выбранной пары спутник – приемник (ROT – rate of TEC) [7]:

$$ROT = \frac{TEC(t) - TEC(t-dt)}{dt}, \quad (2)$$

где dt – некоторый фиксированный шаг наблюдений по времени, который вместе с относительной скоростью горизонтального движения подионосферной точки и плазмы определяет характерный масштаб неоднородностей, к которым чувствительна величина ROT. Чтобы выделить такие более мелкомасштабные флуктуации ТЕС на фоне крупномасштабных градиентов ТЕС в работе [7] был введен индекс ROTI, представляющий собой стандартное отклонение ROT в некотором временном интервале T , характеризующем внешний масштаб:

$$ROTI = \sqrt{\langle ROT^2 \rangle_T - \langle ROT \rangle_T^2}. \quad (3)$$

В работе [7] ROTI индекс введен для системы GPS со следующими параметрами: $dt_{GPS} = 30$ с; $T_{GPS} = 5$ мин. Эти параметры используют сейчас по умолчанию в большинстве исследований, если особо не оговорено иное. В качестве единиц измерения ROTI обычно используют TECu/мин. При характерных скоростях дрейфа плазмы в высоких широтах ~ 1 км/с это позволяет, например, описывать данным индексом неоднородности с характерным масштабом ~ 30 км. Чтобы иметь возможность сопоставить значения ROTI, полученные по данным GPS и Парус/Transit необходимо примерно согласовать внутренние и внешние масштабы неоднородностей, т.е. определить соответствующие значения dt и T для спутников Парус/Transit. Учитывая возможные различные относительные ориентации скоростей дрейфа плазмы и подионосферных точек спутников Парус/Transit, разумным представляется выбор $dt_{TR} = 10$ с, $T_{TR} = 1.5$ мин. Данные параметры использовались нами в дальнейшем в настоящей работе.

2. Используемые данные

В работе используются данные двух расположенных на Аляске вблизи друг друга навигационных приемников. Первый приемник (fair) осуществлял прием сигналов GPS. Он расположен вблизи г. Фэрбанк в точке с координатами (64.978° с.ш., 147.499° з.д.), геомагнитные координаты (65.05° , 264.69°), наклонение магнитного поля 77.13° , соответственно. Данный приемник входит в международную сеть IGS [14], данные фазовых и групповых измерений на обеих рабочих частотах GPS предоставляются в свободном доступе в формате RINEX со скважностью 30 сек. Второй приемник (its) осуществлял прием сигналов Парус/Transit. Он располагался вблизи населенного пункта Гакона в точке с координатами (62.399° с.ш., 145.157° з.д.), геомагнитные координаты (62.89° , 268.44°), наклонение магнитного поля 75.67° , соответственно. Данный приемник входил в американскую цепочку станций низкоорбитальной радиотомографии ионосферы Гакона-Кордова-Дельта, развернутую на Аляске NWRA совместно с NRL [15]. Данные с приемника its находились в открытом доступе до начала 2010-х годов и содержали измерения приведенной фазы для двух рабочих частот систем Парус и Transit с частотой опроса 1 Гц. В настоящей работе использовались данные с обоих приемников за полный 2002 год. Выбор периода обусловлен доступностью данных низкоорбитального приемника, расположенного в Гаконе и наличием все еще достаточно большого числа спутников в созвездиях Парус/Transit. Всего за анализируемый период были доступны данные ~ 3800 пролетов низкоорбитальных спутников Парус/Transit и ~ 19000 пролетов спутников GPS, для каждого из которых строились ряды ROTI индекса, согласно описанию, представленному в предыдущем разделе.

3. Полученные результаты

Экспериментальные данные, полученные в работе, позволили исследовать среднюю суточную изменчивость распределения ионосферных неоднородностей с горизонтальными масштабами порядка нескольких десятков

километров в высоких широтах американского долготного сектора. Для этого отдельно по данным GPS и Парус/Transit, полученным за 2002 год, строились медианные карты распределения ROTI. Поскольку процессы, протекающие в ионосфере, обусловлены влиянием геомагнитного поля и локальным временем точки наблюдения данные карты строились в координатах (MLAT – геомагнитная коширота, MLT – магнитное локальное время). Полученные медианные карты ROTI по данным GPS и Парус/Transit приведены на левых панелях рисунков 1 и 2, соответственно. Хорошо видно, что максимальные значения ROTI по данным GPS заключены в области полярной шапки и аврорального овала и демонстрируют выраженную суточную динамику с максимальными возмущениями в ночном секторе. На картах ROTI, полученных по данным Парус/Transit, помимо этого наблюдается область высоких значений на 63° геомагнитной широте, что соответствует широте станции наблюдения. Эта область наблюдается во всех секторах MLT, однако максимальные интенсивности ROTI регистрируются также в ночном секторе. Такая суточная динамика ROTI по данным GPS и Парус/Transit обусловлена более интенсивной генерацией ионосферных неоднородностей с масштабами порядка нескольких десятков километров в вечерней авроральной области. Наличие дополнительного, доминирующего максимума ROTI на широте станции наблюдения в данных Парус/Transit и отсутствие его в данных GPS можно объяснить особенностями геометрии зондирования и эффектом магнитного зенита [12]. Действительно, принимая во внимание, что ионосферные неоднородности рассматриваемых масштабов преимущественно ориентированы и вытянуты вдоль направления силовых линий магнитного поля, можно ожидать максимальных вариаций ROT, а следовательно, значений ROTI индекса, при просвечивании ионосферы вдоль направлений максимально близких направлениям магнитных силовых линий.

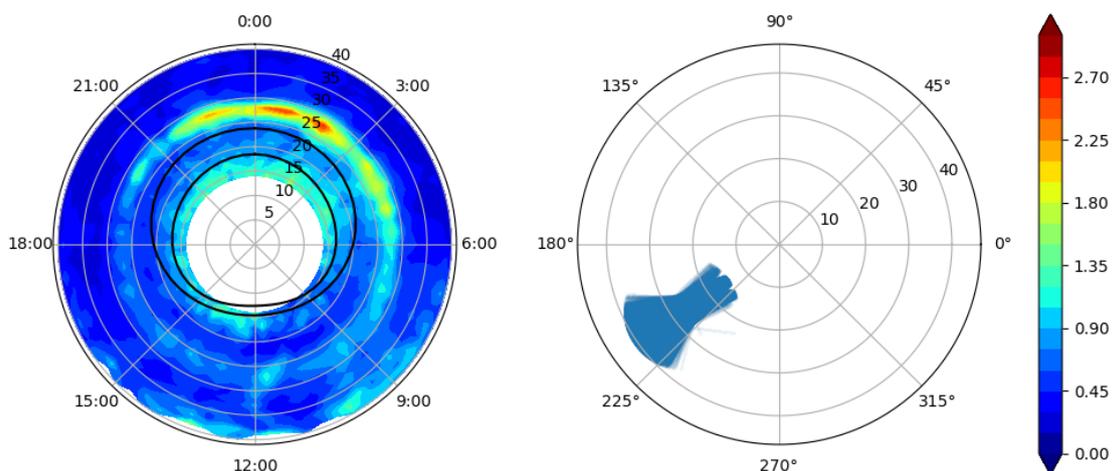


Рис. 1. Среднегодовая карта распределения ROTI [TECU/мин] в координатах (MLAT, MLT) по данным приема сигналов GPS на приемнике fair, черными линиями нанесены границы овала Фельдштейна для невозмущенных геомагнитных условий (слева), и траектории подионосферных точек спутников GPS в географических координатах (справа).

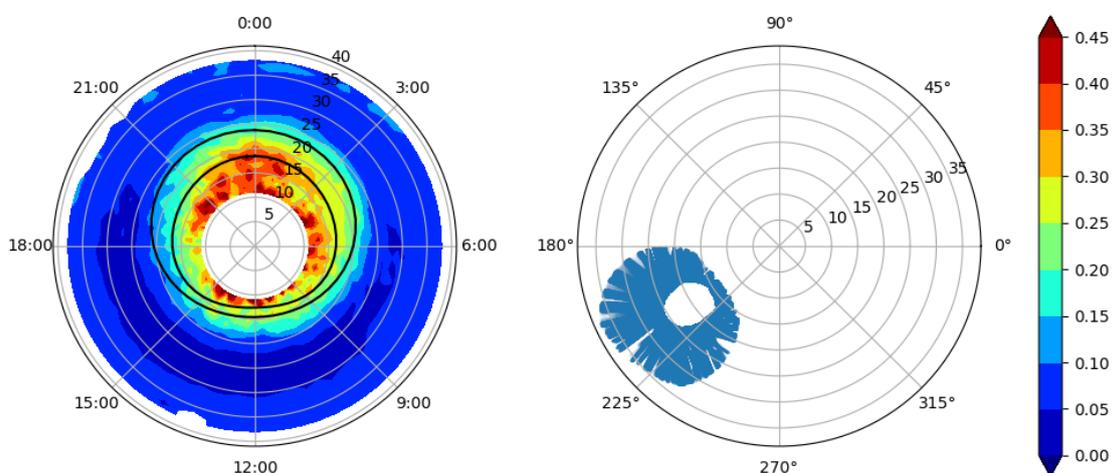


Рис. 2. Среднегодовая карта распределения ROTI [TECU/мин] в координатах (MLAT, MLT) по данным приема сигналов Парус/Transit на приемнике its, черными линиями нанесены границы овала Фельдштейна для невозмущенных геомагнитных условий (слева), и траектории подионосферных точек спутников Парус/Transit в географических координатах (справа).

При увеличении угла между направлением спутник-приемник и геомагнитным полем, амплитуда вариаций ROT будет уменьшаться. Наклонение орбит спутников GPS составляет $\sim 55^\circ$, в то время как спутники Парус/Transit движутся по полярным орбитам. Это приводит к тому, что среди

траекторий движения подионосферных точек спутников Парус/Transit преобладают пересекающие область магнитного зенита станции наблюдений, как показано на рисунке 2 (справа). Для спутников GPS, напротив лишь малая часть траекторий проходит вблизи магнитного зенита станции, как показано на рисунке 1 (справа). Это приводит к тому, что при построении усредненных карт ROTI, представленных на рисунках 1 и 2 слева, основной вклад в ROTI на 63° геомагнитной широте для спутников Парус/Transit дает область магнитного зенита станции, а для спутников GPS области лежащие вдали от него, что и приводит к наблюдаемым отличиям представленных карт. Кроме того, следует также отметить различия (до 2-х раз) в максимальных значениях ROTI, полученных по данным GPS и Парус/Transit даже в области полярной шапки и аврорального овала, где ракурсный эффект усиления флуктуаций фазы для спутников Парус/Transit и рассматриваемых станций уже не играет существенной роли. Это может быть связано с различными относительными скоростями движения подионосферных точек спутников Парус/Transit и GPS и дрейфа ионосферной плазмы. В случае спутников GPS скорости дрейфа плазмы намного превосходят скорости движения подионосферной точки, что приводит к тому, что эффективный масштаб неоднородностей, к которым чувствителен ROTI, определяется в основном скоростью дрейфа плазмы, в то время как для спутников Парус/Transit скорости движения подионосферной точки и дрейфа плазмы оказываются сопоставимы, что приводит к большей вариативности пространственных масштабов неоднородностей, и, как следствие, большему диапазону возможных значений ROTI индекса. Отметим, что на важность корректного учета скорости дрейфа плазмы при анализе данных ROTI также указывали авторы в работе [12]. Также необходимо отметить отличие карты ROTI, полученной в настоящей работе по данным единичного GPS приемника, от карт ROTI, полученных по данным всех северных приемников сети IGS, представленных, например, в работе [16]. За счет использования большего, по сравнению с нашим исследованием, набора траекторий подионосферных точек GPS они позволяют эффективно выделять области генерации ионосферных

неоднородностей, связанных как с авроральным овалом, так и с каспом, а также другими структурами высокоширотной ионосферы.

Заключение

В результате проведенного в работе исследования показано, что ROTI индекс, построенный по данным спутникового радиопросвечивания ионосферы сигналами низкоорбитальных полярных спутников Парус/Transit в высоких широтах обладает сравнимой информативностью с ROTI индексом, построенным по данным среднеорбитальных спутников GPS, при соответствующем согласовании временных масштабов, входящих в определение индекса. Помимо этого, ROTI индекс по данным Парус/Transit обладает дополнительной чувствительностью к ионосферным неоднородностям в области магнитного зенита для высокоширотных приемных пунктов, что обусловлено ракурсным усилением флуктуаций фазы зондирующего сигнала при просвечивании в направлениях близких направлению геомагнитного поля. Такая геометрия зондирования в высоких широтах может быть реализована только с использованием полярных орбит. Для того чтобы в полной мере использовать дополнительную чувствительность в области магнитного зенита при построении карт ROTI представляется разумными использовать ориентированную вдоль меридиана цепочку приемных пунктов сигналов низкоорбитальных спутниковых радиомаяков с расстояниями между приемниками, подобранными так, что для соседних приемников обеспечивалось бы частичное перекрытие областей с наилучшей чувствительностью ROTI индекса. Представление о пространственных масштабах этой области можно получить исходя из рисунка 2. В качестве основы для такой системы можно было бы использовать российскую трансконтинентальную радиотомографическую цепочку, развернутую ПГИ КНЦ РАН совместно с МГУ вдоль линии Баренцбург-Мурманск-Москва-Сочи [17], дополнив ее дополнительными приемниками, обеспечивающими необходимый шаг по широте. Данные работы представляются весьма

актуальными в связи с планируемым запуском на низкие полярные орбиты спутников серии Ионосфера-М и развертыванием низкоорбитального сегмента китайской навигационной системы Weidou.

Авторы благодарны NWRA и IGS за данные, использованные в работе.

Финансирование: Российский научный фонд проект № 23-17-00157.

Литература

1. Keskinen M. J., Ossakow S. L. Theories of high-latitude ionospheric irregularities: A review // *Radio science*. – 1983. – Т. 18. – №. 06. – С. 1077-1091.
2. Tsunoda R. T. High-latitude F region irregularities: A review and synthesis // *Reviews of Geophysics*. – 1988. – Т. 26. – №. 4. – С. 719-760.
3. Phelps A. D. R., Sagalyn R. C. Plasma density irregularities in the high-latitude top side ionosphere // *Journal of Geophysical Research*. – 1976. – Т. 81. – №. 4. – С. 515-523.
4. Tereshchenko E. D. et al. Statistical tomography of subkilometer irregularities in the high-latitude ionosphere // *Radio Science*. – 2004. – Т. 39. – №. 1. – С. 1-11.
5. Tereshchenko E. D. et al. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver // *Annales Geophysicae*. – Göttingen, Germany: Springer Verlag, 1999. – Т. 17. – №. 4. – С. 508-518.
6. Jacobsen K. S., Dähnn M. Statistics of ionospheric disturbances and their correlation with GNSS positioning errors at high latitudes // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2014. – Т. 4. – С. A27.
7. Pi X. et al. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network // *Geophysical Research Letters*. – 1997. – Т. 24. – №. 18. – С. 2283-2286.
8. Juan J. M. et al. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements // *Journal of Space Weather and Space Climate*. – 2018. – Т. 8. – С. A14.

9. Padokhin A. M. et al. Application of BDS-GEO for studying TEC variability in equatorial ionosphere on different time scales // *Advances in Space Research*. – 2019. – Т. 63. – №. 1. – С. 257-269.
10. Luo X. et al. Local ionospheric plasma bubble revealed by BDS Geostationary Earth Orbit satellite observations // *GPS Solutions*. – 2021. – Т. 25. – №. 3. – С. 117.
11. Yeh K. C., Liu C. H. Radio wave scintillations in the ionosphere // *Proceedings of the IEEE*. – 1982. – Т. 70. – №. 4. – С. 324-360.
12. Carrano C. S., Groves K. M., Rino C. L. On the relationship between the rate of change of total electron content index (ROTI), irregularity strength (CkL), and the scintillation index (S4) // *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. – 2019. – Т. 124. – №. 3. – С. 2099-2112.
13. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. GNSS—global navigation satellite systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more. – Springer Science & Business Media, 2007.
14. International GNSS Service: база данных GPS, ГЛОНАСС : сайт. – USA, Pasadena, 2024. – URL : www.igs.org
15. Kersley L. et al. Radio tomographic imaging of the northern high-latitude ionosphere on a wide geographic scale // *Radio science*. – 2005. – Т. 40. – №. 05. – С. 1-9.
16. Cherniak I., Zakharenkova I., Krankowski A. IGS ROTI Maps: current status and its extension towards equatorial region and Southern Hemisphere // *Sensors*. – 2022. – Т. 22. – №. 10. – С. 3748.
17. Kunitsyn V. E. et al. Transcontinental radio tomographic chain: First results of ionospheric imaging // *Moscow University Physics Bulletin*. – 2009. – Т. 64. – С. 661-663.

Для цитирования:

Падохин А.М., Андреева Е.С., Назаренко М.О., Карлышева А.В., Павлов И.А., Курбатов Г.А. Особенности описания ионосферных неоднородностей высоких широт с помощью ROTI индекса по данным навигационных систем GPS и Transit/Парус // *Журнал радиоэлектроники*. – 2024. – №. 8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2024.8.7>

ФИО: Курбатов Григорий Александрович

Должность: ведущий инженер

Научная степень: без степени

ППО: ведущий инженер

Организация: Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

Город: Москва

Страна: Россия

Коды автора в системах научного цитирования:

SPIN: 0000-0000

Web of Science Researcher ID: 0-0000-0000

ORCID: 0000-0000-0000-0000

Scopus ID: 6601959645