



Локальный мониторинг параметров ионосферы в полярной области по наблюдениям ГНСС

А.О. Куприянов¹✉, Д.А. Морозов¹, Д. Замогильный¹

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ gnss@miigaik.ru

цитирование

Куприянов А.О., Морозов Д.А., Замогильный Д. Локальный мониторинг параметров ионосферы в полярной области по наблюдениям ГНСС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2026. Т. 70, № 1. С. 12–28. DOI:10.30533/GiA-2026-001.

ключевые слова

мониторинг параметров ионосферы, локальная модель ионосферы, полярная ионосфера, полное электронное содержание, ионосферные сцинтилляции

аннотация

В работе рассматривается локальное моделирование ионосферы в полярной области по наблюдениям глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на постоянно действующих станциях фундаментальной астрономо-геодезической сети и Международной ГНСС-службы (англ. International GNSS Service, IGS). Приведена методика совместного использования станций, относящихся к разным сетям, для проведения локального мониторинга полного электронного содержания. Представлены результаты мониторинга в области от 10 до 50° по долготе и от 65 до 75° по широте для периода с 9 по 16 июля 2020 года. В целях мониторинга использовалось 8 станций наблюдений ГНСС, расположенных внутри и в окрестностях данной области. Получены локальные модели пространственного распределения вертикального полного электронного содержания в виде параметров разложения в ряд Тейлора. Средняя квадратическая погрешность для центральной точки модели в среднем составила 0,12 TECU, а максимальное значение — 0,16 TECU. В рассматриваемый период наблюдались интенсивные возмущения ионосферы, выраженные резким изменением полного электронного содержания, что предварительно было связано с прохождением через рассматриваемую область аврорального овала. Для подтверждения этой гипотезы был выполнен анализ данных космического аппарата DMSP-F18. Установлено, что в период наблюдения возмущений авроральный овал проходил непосредственно через рассматриваемую область и отмечалась высокая интенсивность возмущений. Определено, что в процессе прохождения аврорального возмущения вариабельность вертикального полного электронного содержания повышается в среднем в 4,9 раза.

1 Введение

В силу географического положения Российской Федерации наиболее подверженным ионосферным возмущениям регионом на ее территории является Арктика. Возникающие на высоких широтах ионосферные возмущения обусловлены прямым воздействием заряженных частиц, доставляемых солнечным ветром — выбросами солнечной плазмы [1, 2]. Эти возмущения выражаются в повышении проводимости ионосферы и приводят к усилению текущих в ней токов и создаваемых этими токами магнитных полей (магнитные возмущения) [1, 2]. Такие аномальные изменения параметров ионосферы оказывают влияние на функционирование систем коротковолновой радиосвязи и радионавигации¹ [3–5].

Целью работы является разработка методики мониторинга и моделирования параметров ионосферы в Арктической зоне по результатам наблюдений глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) на станциях фундаментальной астрономо-геодезической сети (ФАГС) и сети Международной ГНСС-службы (*англ.* International GNSS Service, IGS)^{2,3}.

В последние годы ФАГС активно развивается в Арктической зоне, несмотря на сложные климатические условия и труднодоступную местность. Созданы пункты на архипелагах Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, Северная Земля, в Карелии, Ненецком и Ямало-Ненецком автономных округах⁴. В составе сети IGS также имеются станции в Арктической зоне, некоторые из них находятся в непосредственной близости от границ РФ (SOD3, TRO1, KIRU, KIR8 и др.). Наибольшая плотность станций IGS и ФАГС характерна для Северо-Западного федерального округа. Имеющаяся плотность станций позволяет организовать в данной области мониторинг и моделирование полного электронного содержания ионосферы с высоким пространственным и временным разрешением. Полученные данные могут быть использованы как для решения прикладных задач в области геодезии, позиционирования, радиолокации и радиосвязи, так и для исследования процессов, протекающих в авроральной ионосфере.

Рассмотрим методику мониторинга параметров ионосферы по наблюдениям ГНСС, выбор локальной области и станций для мониторинга, оценку межканальных задержек станций ФАГС и литеральных задержек ГЛОНАСС для всех станций, результаты мониторинга и особенности изменения параметров ионосферы в полярной области.

2 Материалы и методы

Для мониторинга параметров ионосферы в локальной области при помощи мультиспектральных измерений по сигналам ГНСС целесообразно использовать постоянно действующие наземные станции наблюдений, оснащенные спутниковой геодезической аппаратурой. Для мониторинга ионосферы в полярной области РФ могут применяться данные расположенных там станций IGS, ФАГС, федеральной сети геодезических станций (ФСГС) и др. [6–8]. Рассмотрим факторы, осложняющие их использование.

¹ Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калишин А.С. Модель распространения коротких радиоволн в условиях модификации высокоширотной ионосферы // Комплексные исследования природной среды Арктики и Антарктики: тезисы докладов Международной научной конференции. СПб.: ААНИИ, 2020. С. 316–317.

² IGS Guidelines // International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://igs.org/station-resources/#site-guidelines> (дата обращения: 13.07.2025).

³ Карта пунктов ФАГС // Центр точных эфемерид RGS-CENTRE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://rgs.cgkipd.ru/fags-map> (дата обращения: 13.07.2025).

⁴ Геопрофи. Новости. 16 августа 2022 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://geoprofi.ru/news/samyh-severnyh-punkt-fags-naivyshego-klassa-tochnosti-v-mire-sozdannyh-po-zakazu-fgbu-centr-geodezii-kartografii-i-ipd-zarabotal-na-ostrove-khejsa> (дата обращения: 22.07.2025).

1. Углы наклона орбиты космических аппаратов ГНСС не превышают $64,8^\circ$ (ГЛОНАСС — $64,8^\circ$, GPS — 55° , BDS — 55° , «Галилео» — 56°), из-за чего возникает область небесной сферы, в которой их нет [9]. Для точек, расположенных вблизи полюса, эта область находится примерно вокруг зенита. В результате для каждой наземной станции точки пересечения сигналов ионосферы будут располагаться не равномерно в некоторой области, а в виде овала, как показано на рис. 1. Таким образом, по измерениям одной станции невозможно определить вертикальное полное электронное содержание (англ. Vertical Total Electron Content, VTEC), соответствующее положению этой станции и в близлежащей области радиусом примерно 400 км. Для организации мониторинга ионосферы в конкретной области необходимо заранее спроектировать расположение наземных станций для обеспечения необходимой плотности точек пересечения ионосферы в ее пределах.
2. Большая часть Арктической зоны РФ покрыта водами Северного Ледовитого океана, что ограничивает возможности расположения наземных станций наблюдения ГНСС прибрежной зоной и островами. В настоящее время для мониторинга ионосферы в Арктической зоне могут использоваться станции IGS KIR8, KIRU, NYA2, SOD3 и станции ФАГС ARKH, LOVJ, MURM, NARY. Наибольшая концентрация доступных станций характерна для Кольского полуострова.

Для проведения экспериментального исследования по мониторингу параметров ионосферы в арктической области выбрана территория в районе Кольского полуострова. Границы области, оптимальной для мониторинга и моделирования параметров ионосферы, составляют по долготе от 10° до 50° , по широте — от 65° до 75° . Границы выбранного района, а также расположенные в его пределах и поблизости станции IGS и ФАГС представлены на рис. 2.

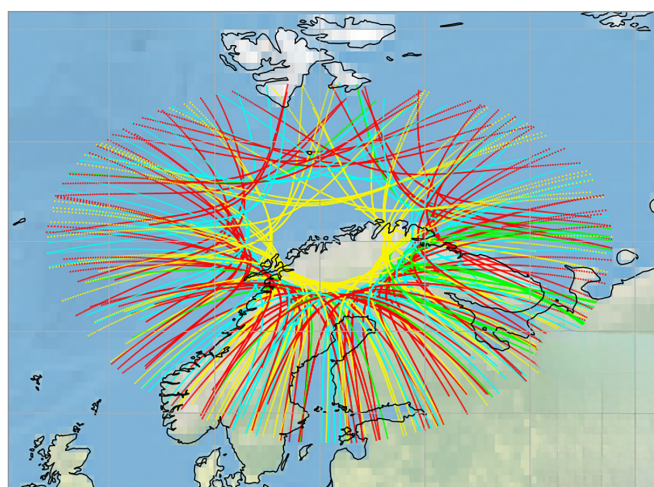
Для оценки возможностей мониторинга параметров полярной ионосферы по наблюдениям ГНСС на наземных станциях используется специальное программное обеспечение ISIS, разработанное на кафедре прикладной геодезии Московского государственного университета геодезии и картографии. Программное обеспечение реализует следующую методику локального моделирования ионосферы:

Рис. 1 ✓

Картограмма расположения точек пересечения ионосферы для станции KIRU ($B = 67,857^\circ$, $L = 20,968^\circ$)

Fig. 1

Cartogram of the ionospheric pierce points for the KIRU station ($B = 67.857^\circ$, $L = 20.968^\circ$)



Условные обозначения

Треки космических аппаратов ГНСС

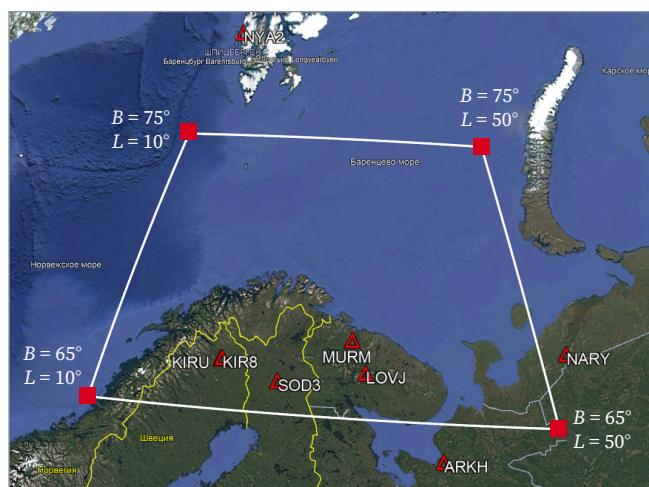
GPS	BDS
ГЛОНАСС	«Галилео»

Рис. 2 ✓

Район экспериментального исследования

Fig. 2

Experimental research area



Условные обозначения

△ постоянно действующая станция ГНСС

1. Выполняется выбор комбинаций сигналов, для которых будет вычисляться VTEC. С учетом технических характеристик установленной спутниковой геодезической аппаратуры для рассматриваемых станций целесообразно использование следующих комбинаций (пар сигналов): GPS L1/L2 и L1/L5, ГЛОНАСС L1/L2, BDS B1/B2 и B1/B3, «Галилео» E1/E5, E1/E6.
2. Для используемых станций ФАГС выполняется оценка межканальных задержек (*англ.* Differential Code Biases, DCB) с применением глобальных ионосферных карт (*англ.* Global Ionosphere Maps, GIM) от IGS [10] при помощи метода, рассмотренного в работе [11], для каждой рассматриваемой пары сигналов.
3. Для используемых станций ФАГС и IGS аналогичным образом выполняется оценка литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС, т. е. определяются отдельные значения DCB для каждой литеры (от -7 до 6), используемой в системе.
4. Для каждой станции выполняется вычисление VTEC и геодезических координат (широты и долготы) точки пересечения ионосферы (*англ.* Ionospheric Pierce Point, IPP). Вычисление VTEC производится в следующем порядке для каждой комбинации сигналов:
 - вычисляются разности кодовых и фазовых псевдодальностей на двух частотах для каждого спутника и каждой эпохи наблюдений;
 - в вычисленные разности вносится поправка за межканальную задержку;
 - по известной формуле вычисляются значения полного электронного содержания по кодовым измерениям (TEC_P) и по фазовым измерениям (TEC_L);
 - выделяются ряды непрерывных наблюдений кодовых и фазовых псевдодальностей;
 - для каждого ряда вычисляются разности TEC_P и TEC_L , средневзвешенные значения разности (dPL_{cp}) и итоговые значения TEC как $TEC_L + dPL_{cp}$;
 - по координатам станции и спутника для каждого момента времени вычисляется геодезическая широта и долгота IPP, а также значения эллипсоидальной функции отображения ионосферы MF^5 ;
 - вычисляются значения VTEC как произведение TEC и MF .
5. Для каждой эпохи наблюдений выполняется оценка коэффициентов разложения VTEC в двухмерный ряд Тейлора⁶ (зависимость VTEC от геодезической широты и долготы) при помощи метода наименьших квадратов или расширенного фильтра Калмана (*англ.* Extended Kalman Filter, EKF). При использовании EKF обработка производится в прямом и обратном направлениях, после чего вычисляется смешанное решение.
6. Формируется локальная модель ионосферы в виде значений VTEC, заданных в узлах регулярной сетки для каждой эпохи наблюдений. Вычисление VTEC для каждого узла выполняется при помощи полученных для этой эпохи коэффициентов разложения VTEC в двухмерный ряд Тейлора. Результат сохраняется в формате IONEX.

Для проведения вычислительного эксперимента по мониторингу параметров ионосферы в заданной области был выбран период с 9 по 16 июля 2020 года. Выбор обусловлен спокойной ионосферой с Kp -индексом не более 2, за исключением двух дней (13 и 14 июля), когда наблюдалась повышенная геомагнитная активность с Kp -индексом 4–5. Это позволяет пронаблюдать в рамках одного периода результат работы методики как для спокойной, так и для возмущенной ионосферы.

⁵ Xu G., Xu Y. Applications of GPS Theory and Algorithms. GPS: Theory, Algorithms and Applications. 3rd ed. Berlin: Springer, 2016. 489 p.

⁶ Wild U. Ionosphere and Geodetic Satellite Systems, Permanent GPS Tracking Data for Modelling and Monitoring. Zurich: Schweizerische Geodätische Kommission, 1994. Bd. 48. 155 p.

Для выбранного периода имеются непрерывные наблюдения на станциях ФАГС ARKH, LOVJ, MURM, NARY и станциях IGS KIR8, KIRU, NYA2, SOD3. Такой набор станций позволяет получить достаточную плотность точек пересечения ионосферы в заданной области. На рис. 3 представлено расположение точек пересечения ионосферы в рамках заданной области для выбранных станций на интервале времени в одни сутки.

Наблюдения на доступных станциях позволяют получить от 74 до 135 IPP для каждой эпохи наблюдений в пределах исследуемой области. Зависимость количества IPP от времени представлена в виде графика на рис. 4.

Имеющееся количество IPP позволяет создавать мгновенные локальные модели ионосферы в виде коэффициентов разложения в ряд Тейлора третьего – четвертого порядка. Следует отметить, что соотношение IPP, относящихся к разным ГНСС, в данном случае обусловлено техническими характеристиками используемой на выбранных станциях спутниковой геодезической аппаратуры (поддерживаемыми сигналами), а не свойствами самих ГНСС.

Рис. 3 

Расположение точек пересечения ионосферы в заданной области и всех возникающих

Fig. 3

The location of the ionospheric pierce points in the given area and all emerging ones

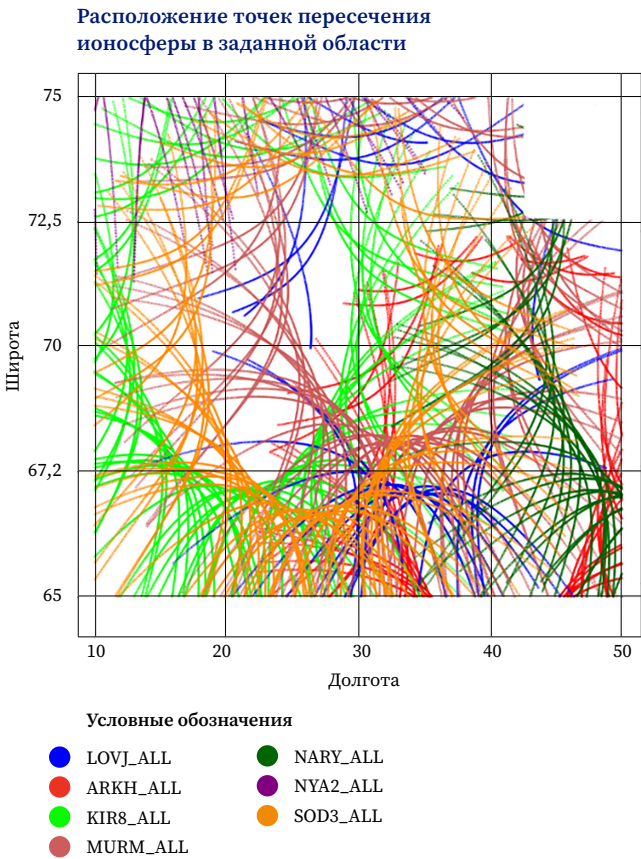
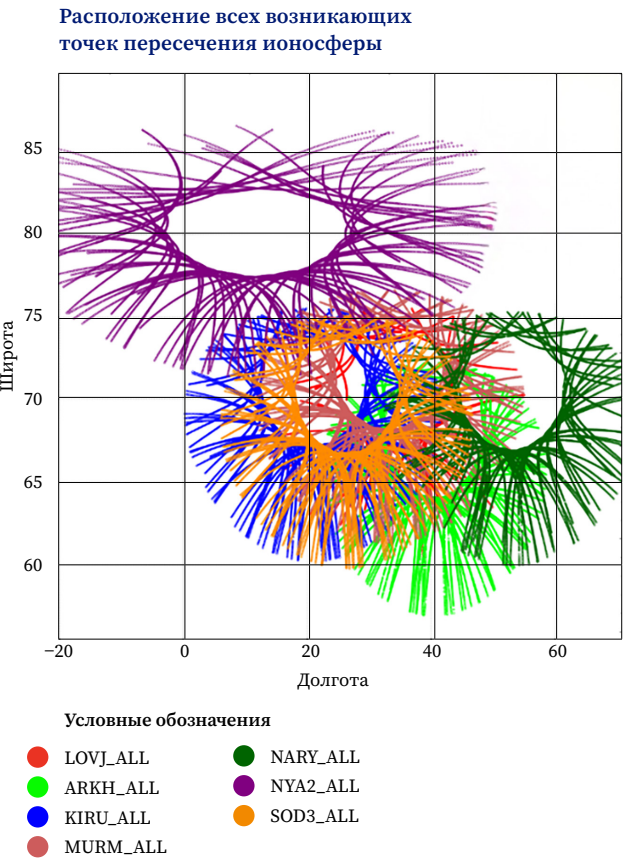
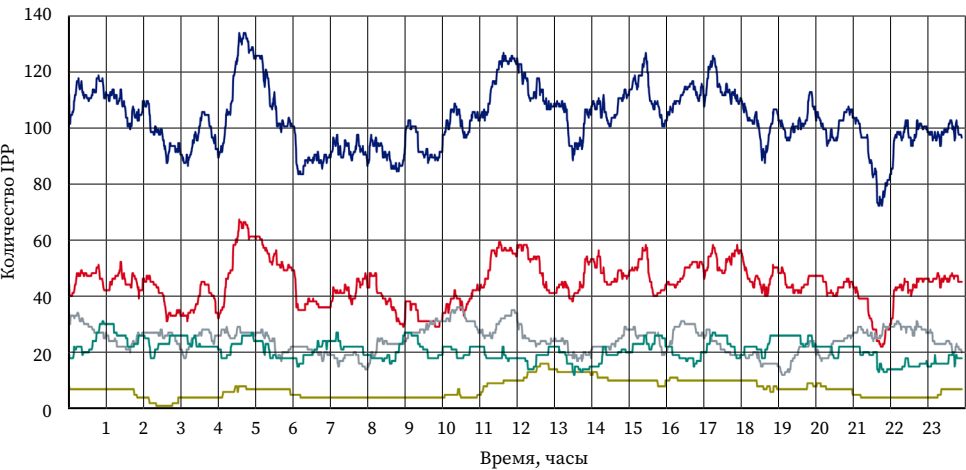
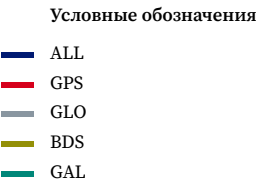


Рис. 4 

Зависимость количества точек пересечения ионосферы от времени

Fig. 4

Dependence of the amount of ionospheric pierce points on time



3 Результаты

Существенным фактором, осложняющим использование станций ФАГС для мониторинга параметров ионосферы, является отсутствие необходимых для вычисления VTEC данных о межканальных задержках установленной аппаратуры. Для станций IGS межканальные задержки установленной на станциях аппаратуры оцениваются на регулярной основе⁷ и распространяются в формате BSX⁸. Для станций ФАГС оценка межканальных задержек на регулярной основе не производится. Кроме того, формат BSX не предусматривает хранение литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС в приемнике, возникающих из-за того, что спутники ГЛОНАСС используют разные несущие частоты (в зависимости от литеры). Для оценки межканальных задержек станций DCB_{STA}^{SYS} ФАГС и литеральных задержек сигналов ГЛОНАСС $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ всех станций произведены дополнительные вычисления с применением GIM [12] в формате IONEX на соответствующие даты. Задержки оценивались как средневзвешенное разностей TEC, вычисленных по измерениям, и TEC, вычисленных по GIM:

$$1 \quad DCB_{STA}^{SYS} = \frac{\sum_0^n (TEC - TEC_{IONEX})P}{\sum_0^n P},$$

где TEC — полное электронное содержание, вычисленное по разностям измеренных псевдодальностей на двух частотах;

TEC_{IONEX} — полное электронное содержание, вычисленное по глобальной ионосферной карте в формате IONEX;

P — вес соответствующего значения TEC ;

n — количество используемых значений TEC .

Значения весов назначаются следующим образом:

$$2 \quad P = \frac{1}{MF},$$

где MF — значения эллипсоидальной функции отображения ионосферы.

Результаты оценки $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и DCB_{STA}^{SYS} для всех рассматриваемых станций приведены на рис. 5 и 6 соответственно. В качестве результирующих значений используются осредненные значения $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и DCB_{STA}^{SYS} за 8 суток. Выполнена также оценка средних квадратических погрешностей (СКП) $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и СКП DCB_{STA}^{SYS} по независимым значениям задержки, полученным на каждые сутки. Результаты оценки СКП приведены в виде гистограмм на рис. 7 и 8.

На рис. 7 видно, что СКП $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ в худшем случае составляет 0,37 нс, в большинстве случаев не превышает 0,20 нс, а в среднем равна 0,14 нс. Если перейти от непосредственно задержек к их влиянию на оценку полного электронного содержания (TEC), то эти значения соответствуют 1,08; 0,58; 0,41 TECU для комбинации сигналов ГЛОНАСС L1/L2. Различия в СКП $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ обусловлены как разным количеством измерений, использованных при оценке (из-за разного числа наблюдаемых спутников с конкретной литерой и разных траекторий их прохождения), так и особенностями станции (применяемая аппаратура, условия наблюдений и помехи, нарастающая интенсивность ионосферных возмущений с увеличением широты).

Необходимо также рассмотреть, насколько обобщенные задержки DCB_{STA}^{GLO} искажают результат по сравнению с использованием $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$, чтобы сделать выводы о целесообразности оценки литеральных задержек при локальном мониторинге ионосферы. Исходя из сравнения оцененных $DCB_{STA}^{GLO,LIT}$ и значений DCB_{STA}^{GLO} , полученных из файлов BSX, публикуемых IGS, можно

7 Steigenberger P., Montenbruck O. Multi-GNSS Working Group. Technical Report 2022. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elib.dlr.de/195430/1/MGWG_2022.pdf (дата обращения: 13.07.2025).

8 Bias SINEX 1.00 (December 2016) // International GNSS Service. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://igs.org/products/#differential_code_bias_2237 (дата обращения: 13.07.2025).

9 Методы моделирования ионосферы // Прикладной потребительский центр ГЛОНАСС. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://glonass-iac.ru/iono/methods/> (дата обращения: 13.07.2025).

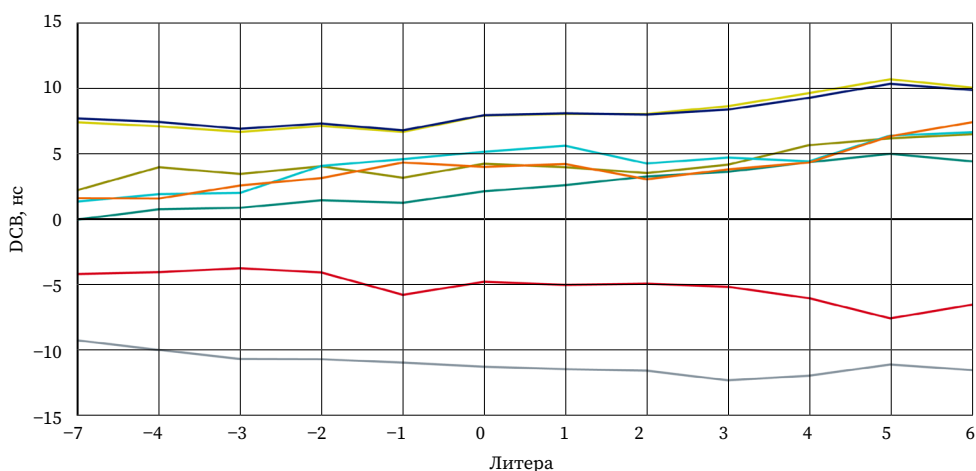
сделать вывод, что $DCB_{STA}^{GLO} \approx DCB_{STA}^{GLO, LIT=0}$, т. е. средние значения задержки примерно соответствуют средней литере. На рис. 9 приведены графики разностей $DCB_{STA}^{GLO, LIT=i} - DCB_{STA}^{GLO, LIT=0}$, из которых следует, что расхождения для крайних литер может достигать 4 нс.

Рис. 5 ➤

Графики зависимости межканальных задержек ГЛОНАСС от литеры

Fig. 5

Graphs of the dependence of GLONASS inter-channel delays on the slot



Примечание. Литеры -5 и -6 отсутствуют на этом и последующих графиках, т. к. на рассматриваемый период спутников с такими литерами нет в составе орбитальной группировки ГЛОНАСС.

Рис. 6 ➤

Гистограмма межканальных задержек станций

Fig. 6

Histogram of inter-channel station delays

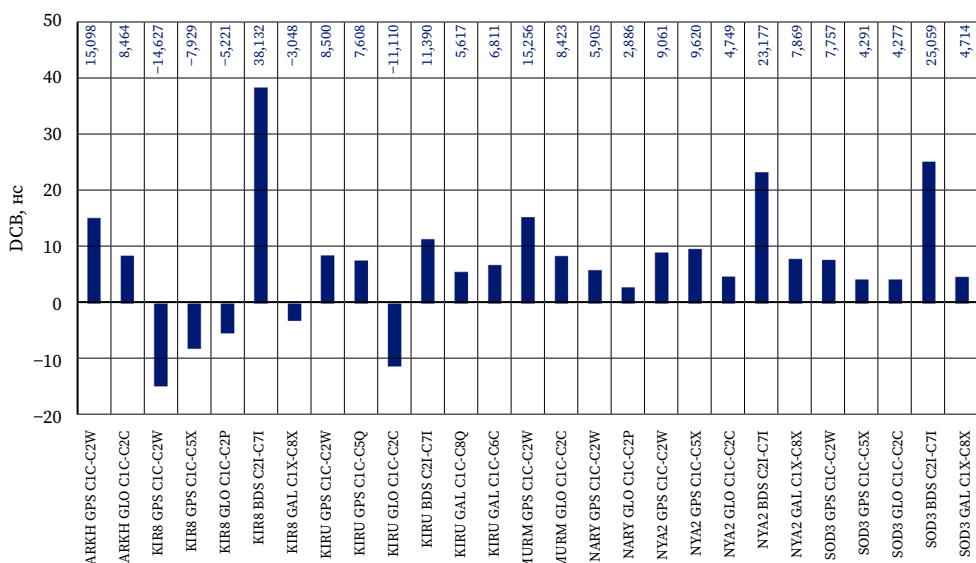


Рис. 7 ➤

Гистограмма СКП межканальных задержек ГЛОНАСС в зависимости от литеры

Fig. 7

RMS histogram of GLONASS interchannel delays depending on the slot

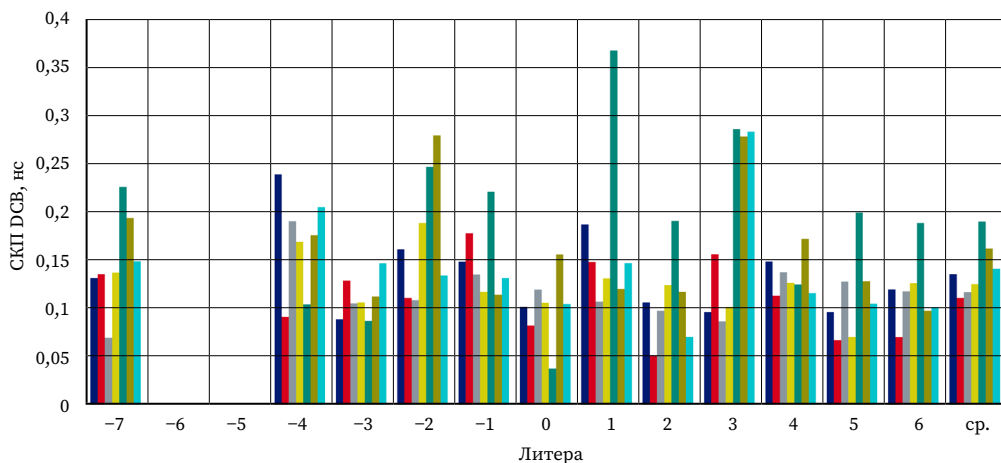


Рис. 8 ➔

Гистограмма СКП межканальных задержек станций по рассматриваемым парам сигналов

Fig. 8

RMS histogram of inter-channel station delays for the considered signal pairs

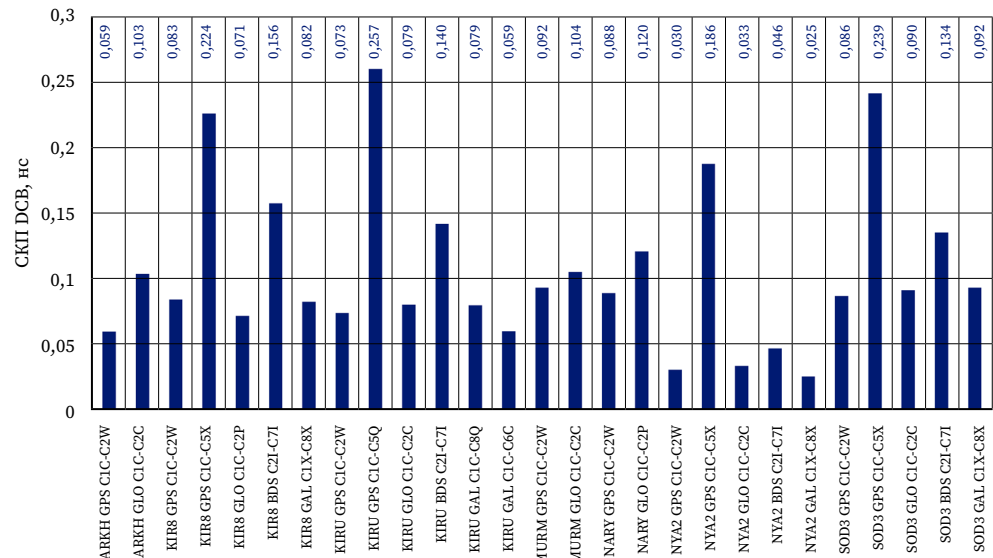
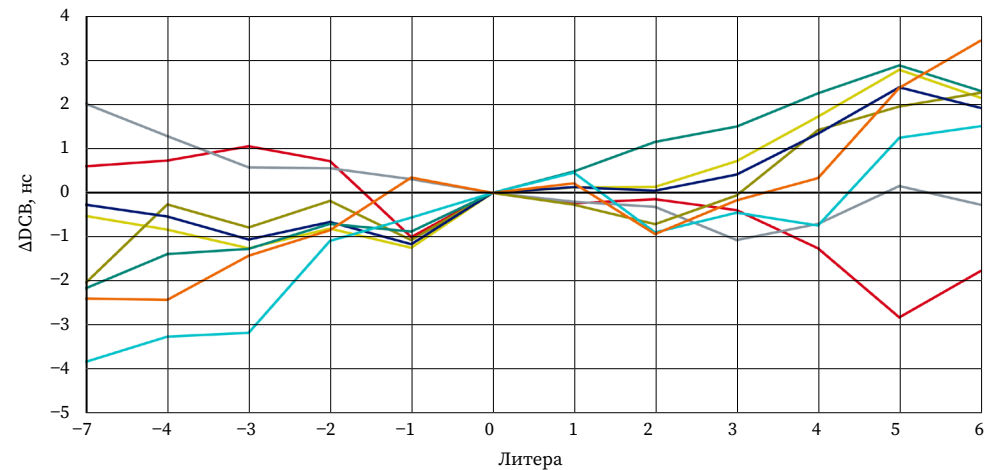


Рис. 9 ➔

Графики разностей межканальных задержек между литерой 0 и заданной литерой

Fig. 9

Graphs of channel-to-channel delay differences between the spot 0 and the given spot



Таким образом, влияние литеральных задержек на оценку ТЕС может быть сопоставимо с влиянием межканальных задержек как таковых (или даже превышать его), и если их игнорировать, то оценки ТЕС по измерениям ГЛОНАСС будут отягощены существенными систематическими погрешностями. На графиках $DCB_{STA}^{GLO,LIT=i} - DCB_{STA}^{GLO,LIT=0}$ также наблюдается зависимость (в некоторых случаях прямая, а в некоторых — обратная) литеральной задержки от номера литеры. Исходя из этого, следует рассмотреть установление функциональной зависимости между ними. На рис. 10 представлена линейная (2 параметра) и полиномиальная (4 параметра) аппроксимация ряда литеральных задержек для станции SOD3. И для этой, и для других станций достоверность линейной аппроксимации составляет порядка 77 %, а полиномиальной третьего порядка — 89 %.

Далее в соответствии с методикой были выполнены вычисление VTEC и оценка параметров локальных моделей ионосферы. По результатам вычислений получены мгновенные локальные модели ионосферы для рассматриваемой области с интервалом по времени в 30 секунд на период в 8 суток с 9 по 16 июля 2020 года. На рис. 11 приведен график зависимости VTEC от времени для центральной точки локальной области ($B = 70,0^\circ$, $L = 30,0^\circ$), а на рис. 12 — график СКП VTEC для той же точки, которая в среднем составила 0,12 TECU (с максимальным значением, равным 0,16 TECU). Кроме того, на рис. 12 по правой вертикальной оси приведено значение числа станций, использованных в процессе обработки для конкретных суток. Для большей части суток в рассматриваемом периоде были доступны наблюдения на всех восьми станциях, но для 15 июля была

недоступна одна станция (NYA2), а для 16 июля — две (NYA2 и KIRU). Отсутствие данных со станции NYA2 существенно не повлияло на СКП VTEC. Это объясняется тем, что эта станция наиболее удалена от области моделирования и лишь небольшая часть относящихся к ней IPP в нее попадает. Отсутствие данных со станции KIRU, находящейся в пределах области моделирования, привело к увеличению СКП VTEC на 19 %, а СКП от СКП VTEC — на 26 %.

Полученные модели представлены в виде значений VTEC, заданных в узлах регулярной сетки. Для хранения результатов использован формат IONEX. Временное разрешение полученного файла составляет 30 секунд, шаг сетки по широте и долготе равен 1° . На рис. 13 представлена визуализация результатов в виде тепловых карт VTEC в TECU на отдельные эпохи.

Рис. 10 ➔

Варианты линейной и полиномиальной аппроксимации

Fig. 10

Linear and polynomial approximation options

Условные обозначения

— SOD3

..... Линейная (SOD3)

..... Полиномиальная (SOD3)

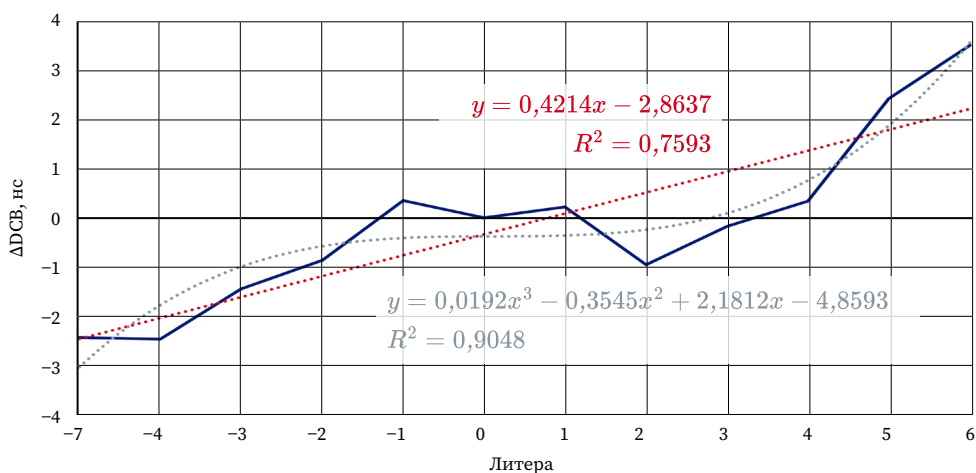


Рис. 11 ➔

VTEC для центральной точки модели, полученные при локальном моделировании ионосферы через EKF

Fig. 11

VTEC models for the central point obtained from local ionospheric modeling via EKF

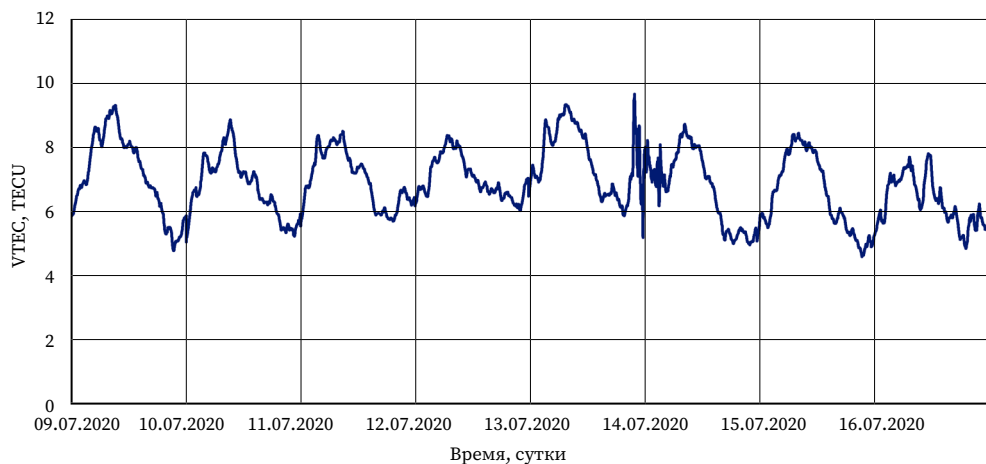


Рис. 12 ➔

СКП VTEC для центральной точки модели, полученные при локальном моделировании ионосферы через EKF, и количество станций, используемых при обработке

Fig. 12

VTEC RMS for the central point of the model obtained by local modeling of the ionosphere through EKF and the number of stations used in processing

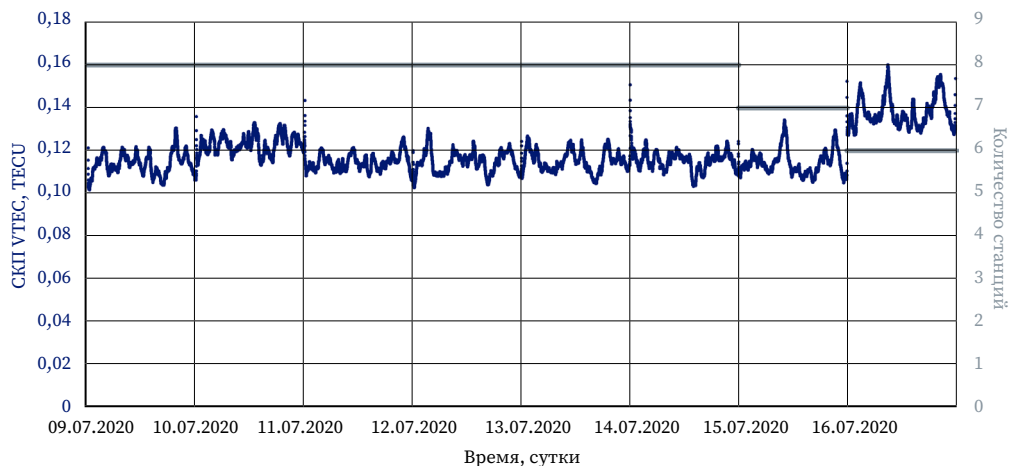
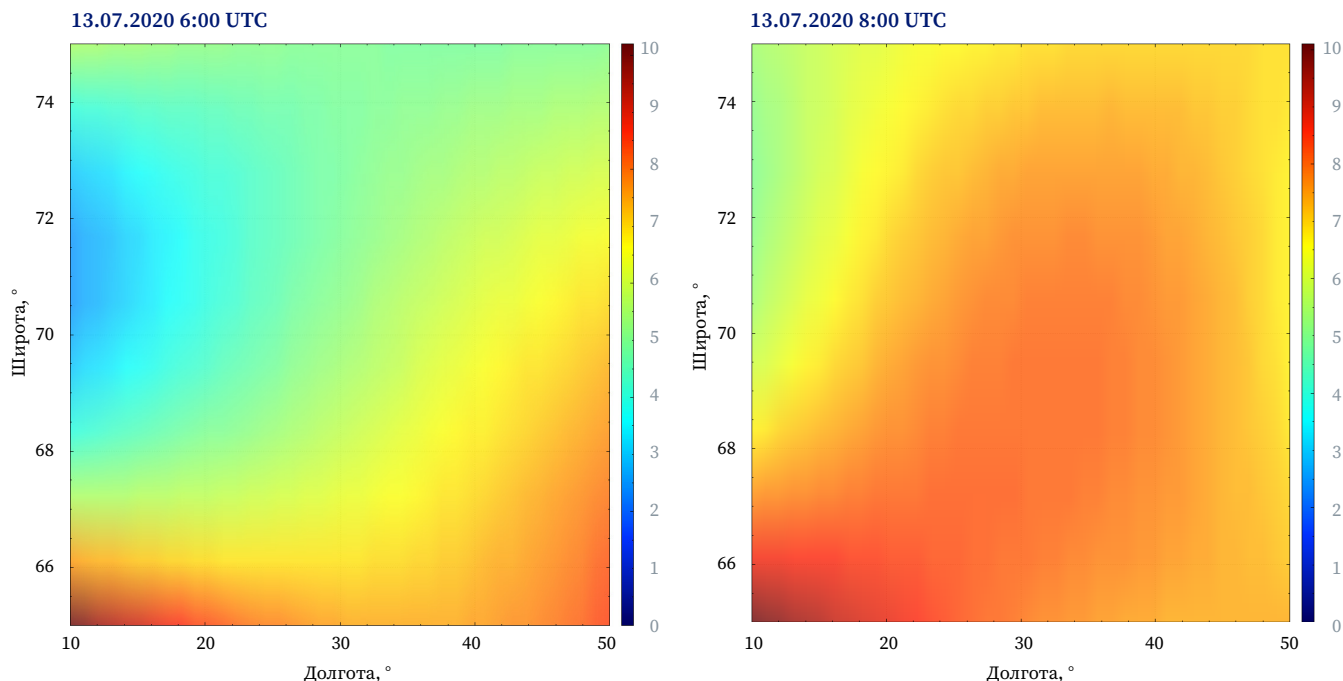


Рис. 13 

Тепловые карты VTEC, полученные в результате локального моделирования

Fig. 13

VTEC heat maps obtained as a result of local modeling



4 Обсуждение

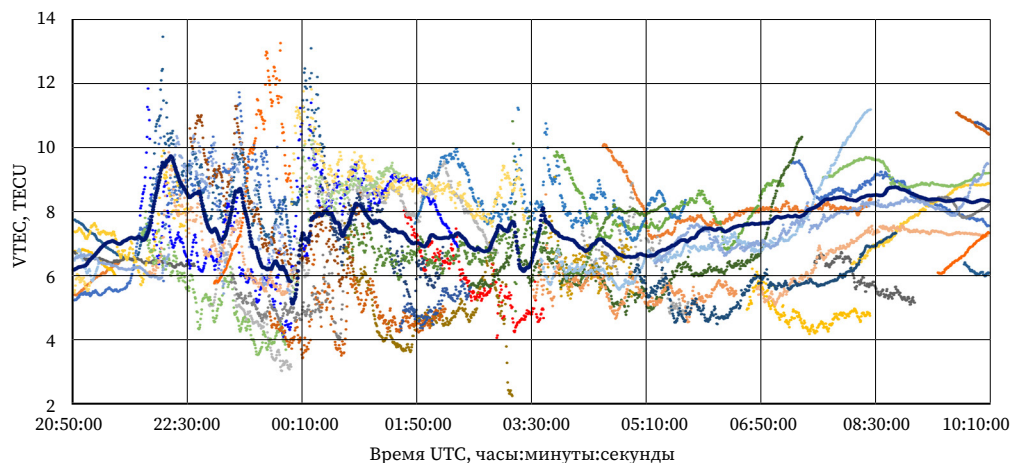
На рис. 11 отчетливо наблюдается эффект резкого изменения VTEC в конце 13 июля и в начале 14 июля. Наблюдаемые возмущения были предварительно связаны с прохождением через рассматриваемую область аврорального овала. Для проверки этой гипотезы данные, полученные в период с 20:50 13 июля до 10:10 14 июля, были рассмотрены более детально, в частности построены графики зависимости VTEC от времени для каждого наблюдаемого спутника. В качестве примера на рис. 14 приведены графики временных рядов VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS, и VTEC для центральной точки модели, полученных по результатам локального моделирования ионосферы.

Рис. 14 

Графики временных рядов VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS, и VTEC для центральной точки модели, полученных по результатам локального моделирования ионосферы

Fig. 14

VTEC time series graphs calculated from L1/L2 GPS and VTEC measurements for the central point of the model obtained from the results of local ionospheric modeling



Условные обозначения

 G1  G3  G5  G7  G9  G11  G13  G15  G18  G20  G22  G25  G27  G29  G31
 G2  G4  G6  G8  G10  G12  G14  G16  G19  G21  G24  G26  G28  G30  G32
 VTEC

На рисунке отчетливо видно, что резкие изменения VTEC характерны для всех наблюдаемых сигналов и не являются результатом отдельных некорректных наблюдений или несовершенства алгоритмов обработки измерений. Для других комбинаций сигналов результаты в рамках данного периода аналогичны.

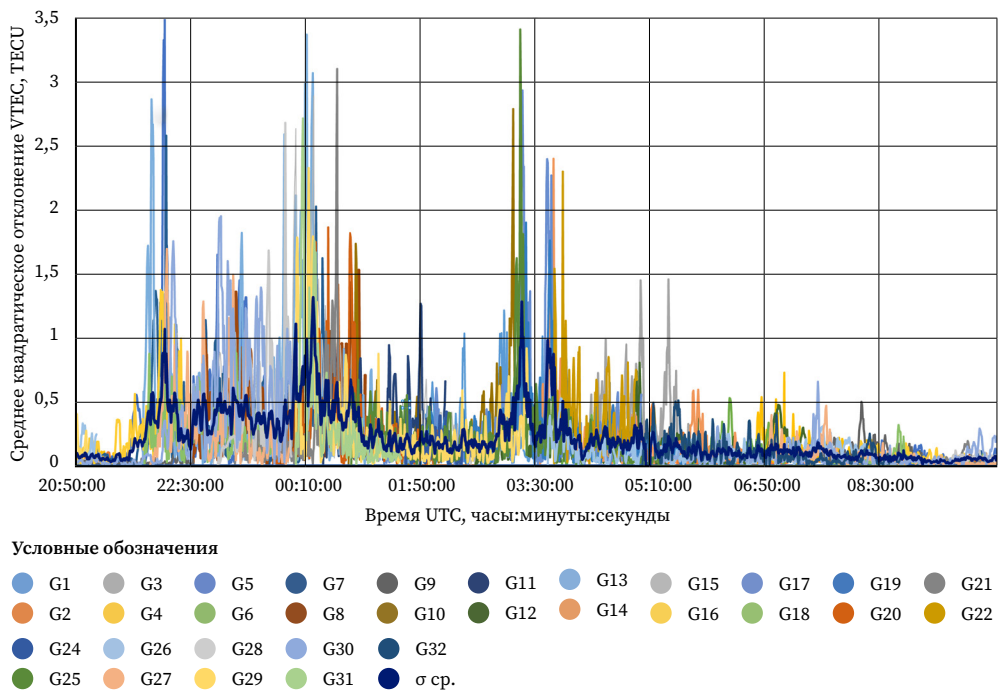
Для формализации полученного результата в качестве критерия возмущенности ионосферы было выбрано среднее квадратическое отклонение VTEC, вычисленное по отклонениям от аппроксимирующей прямой на периоде в 9 эпох наблюдений. График временных рядов средних квадратических отклонений VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS для интервала $n = 9$, приведен на рис. 15.

Рис. 15 ➔

Графики временных рядов средних квадратических отклонений VTEC, вычисленных по измерениям L1/L2 GPS для интервала $n = 9$

Fig. 15

Graphs of time series of VTEC mean square deviations calculated from L1/L2 GPS measurements for the interval $n = 9$



Для определения сущности наблюдаемых эффектов выполним перекрестное сравнение полученных результатов с данными космического аппарата DMSP-F18. Оборонная метеорологическая спутниковая программа (*англ.* Defense Meteorological Satellite Program, DMSP) представляет собой серию спутников на полярной орбите, предназначенных для мониторинга метеорологических, океанографических и солнечно-земных явлений с акцентом на исследования космической погоды и ионосферы. Расположенные на низкой околоземной орбите на высоте около 860 км спутники оснащены набором инструментов, включая специальный сенсор ультрафиолетового спектрографического изображения (*англ.* Special Sensor Ultraviolet Spectrograph Imagers, SSUSI) [13], который предоставляет данные для анализа ионосферы и термосферы Земли. SSUSI измеряет ультрафиолетовые излучения в различных спектральных диапазонах, таких как полосы Лаймана — Бирджа — Хопфилда (LBH) молекулярного азота, линии атомарного кислорода на длинах волн 130,4 нм и 135,6 нм, а также излучения водорода на 121,6 нм. Эти измерения позволяют создавать экологические и сенсорные записи данных, которые характеризуют параметры ионосферы, активность северного сияния и состав нейтральной атмосферы, предоставляя информацию о динамике космической погоды и вариабельности ионосферы.

Для анализа состояния ионосферы наиболее подходящими параметрами SSUSI являются УФ-излучения на длине волны 135,6 нм и LBH [13–15].

Длине волны 135,6 нм соответствует линия излучения атомарного кислорода. Это излучение возникает в результате перехода электронов в атомах кислорода между энергетическими уровнями, когда они возбуждаются в верхней атмосфере (в основном в термосфере и ионосфере, на высотах от ~50 до 750 км). Такое излучение является частью естественного свечения атмосферы, которое

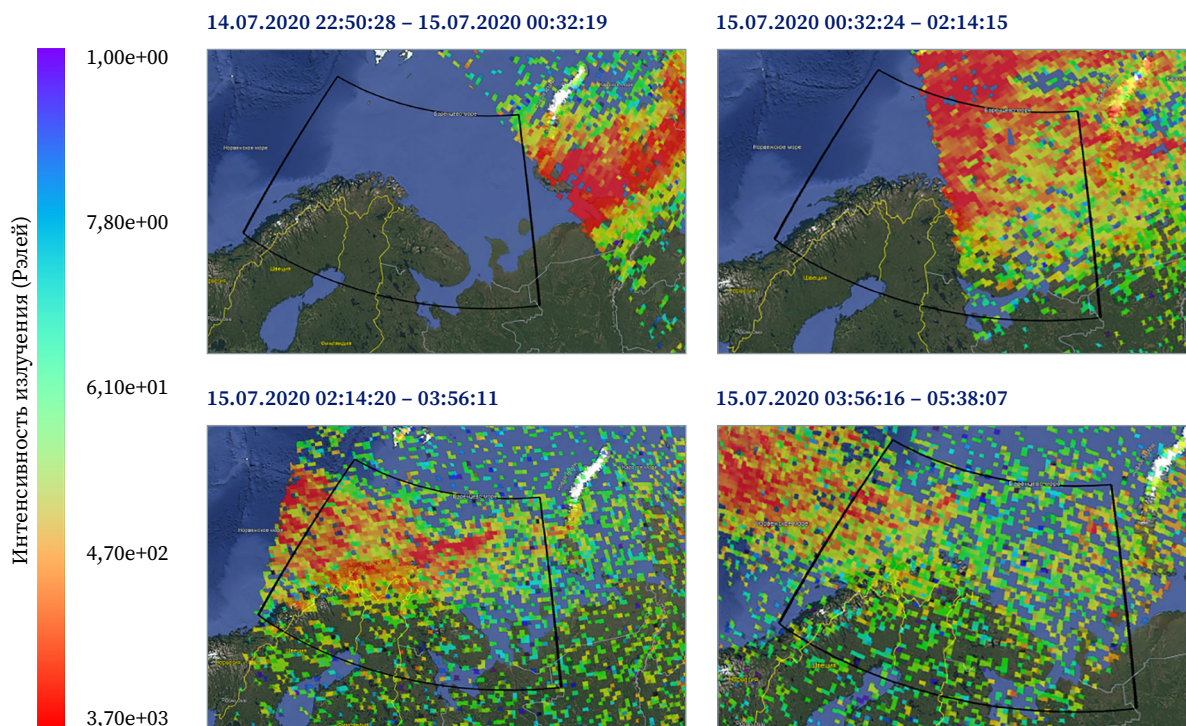
можно наблюдать как в дневное, так и в ночное время. SSUSI измеряет излучение в диапазоне от 80 до 170 нм с разрешением около 1,8 нм, и линия 135,6 нм является одной из ключевых для анализа состава и свойств ионосферы. Это излучение связано с присутствием атомарного кислорода, который преобладает в верхней атмосфере и играет важную роль в ионосферных процессах. Исходя из вышесказанного, для анализа в дальнейшем будем использовать именно УФ-излучения на длине волны 135,6 нм.

На рис. 16 приведены тепловые карты интенсивности излучения для рассматриваемой локальной области на четыре временных промежутка, построенных по данным DMSP-F18. На рисунке видно, что в рассматриваемый период авроральное возмущение ионосферы распространялось через рассматриваемую область. Из-за ограниченной ширины полосы, для которой доступны данные DMSP-F18, нельзя точно сказать, какую форму имела западная часть возмущения и как протекал процесс его вхождения в исследуемую область. При этом можно наблюдать, что выход возмущения из исследуемой области происходил постепенно с плавным уменьшением интенсивности и покрываемой площади, что соответствует данным, представленными на рис. 15, где хорошо видно, что интенсивность возмущений VTEC плавно уменьшается вплоть до 8:30 14 июля.

Данные интенсивности излучения и средних квадратических отклонений VTEC (которые косвенно характеризуют ионосферные сцинтилляции сигналов ГНСС) демонстрируют аналогичную реакцию на данное ионосферное возмущение. Это свидетельствует об эффективности представленной методики мониторинга параметров ионосферы для исследования ионосферных возмущений в полярной области.

Рис. 16 
Тепловые карты интенсивности излучения для рассматриваемой локальной области, построенные по данным DMSP-F18

Fig. 16
Heat maps of radiation intensity for the local area under consideration, based on DMSP-F18 data



5 Выводы

По результатам проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Рассматриваемая методика и технология позволяет производить локальный мониторинг параметров ионосферы в полярных областях с высокими точностью, временным (30 секунд) и пространственным (1°) разрешением.

2. Совместное использование станций ФАГС и IGS позволяет получить в некоторых районах достаточную плотность станций и, следовательно, IPR для получения локальных моделей с высокой дискретностью.
3. Оценка литеральных задержек является существенным и необходимым фактором, особенно в ситуации, когда большая часть приемников на станциях работает только по сигналам ГЛОНАСС и GPS. Использование средней межканальной задержки для всех литер приведет к существенным систематическим погрешностям VTEC.
4. В процессе прохождения аврорального возмущения вариабельность вертикального полного электронного содержания повышается в среднем в 4,9 раз.
5. Данные DMSP-F18 можно использовать как один из критериев, объясняющих авроральные возмущения, для создания эмпирической ионосферной модели в полярной области на основе рассматриваемой методики и интегрирования нейронных сетей.
6. Результаты мониторинга VTEC можно применять для определения областей, затронутых авроральными возмущениями ионосферы, и потенциально — для их картографирования.

библиография

1. Соловьев К.В., Шайдулин З.Ф. Усовершенствованный алгоритм расчета параметров ионосферы Арктической зоны // Научная мысль. 2018. Т. 4, № 2 (28). С. 135–140.
2. Демьянов В.В., Ясюкевич Ю.В., Кашкина Т.В. и др. Экспериментальные наблюдения ускорения фазы несущей в условиях полярной ионосферы // Радиотехника и электроника. 2016. Т. 61, № 10. С. 946–951. DOI:10.7868/S0033849416100089.
3. Папырин В.В., Сидоров В.К. Проблемы организации коротковолновой радиосвязи в Арктике и возможные пути их решения // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2020. № 1. С. 1–4.
4. Кулешов И.А., Солозобов С.А., Шевченко В.В. Проблемы радиосвязи в Арктике // Техника средств связи. 2018. № 3 (143). С. 21–31.
5. Кузьмичев А.П. Проблемы организации связи с труднодоступными и полярными станциями // Российские полярные исследования. 2014. № 3 (17). С. 24–27.
6. Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J., et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information since 1998 // Journal of Geodesy. 2009. Vol. 83. P. 263–275. DOI:10.1007/s00190-008-0266-1.
7. Abdelazeem M., Celik R.N., El-Rabbany A. An Enhanced Real-Time Regional Ionospheric Model Using IGS Real-Time Service (IGS-RTS) Products // Journal of Navigation. 2016. Vol. 69. Iss. 3. P. 521–530. DOI:10.1017/S0373463315000740.
8. Liu H., Ren X., Xu G. Investigating the Performance of IGS Real-Time Global Ionospheric Maps under Different Solar Conditions // Remote Sensing. 2023. Vol. 15. Iss. 19. P. 4661. DOI:10.3390/rs15194661.
9. Шепель В.И., Ергалиев Д.С., Тулегулов А.Д. Сравнительный анализ глобальных навигационных спутниковых систем // Надежность и качество: труды Международного симпозиума: в 2 т. Пенза: ПГУ, 2012. Т. 1. С. 469–470.
10. Wu Q., Zhang P., Sun M., et al. Performance Evaluation of Gims Released by Different IGS Ionosphere Associate Analysis Centers in Ionospheric Constrained Single-Frequency Precise Point Positioning // Advances in Space Research. 2021. Vol. 68. Iss. 12. P. 4834–4856. DOI:10.1016/j.asr.2020.12.006.
11. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps // Navigation. 2014. Vol. 61. No. 3. P. 191–201.
12. Gulyaeva T.L., Arian F., Hernandez-Pajares M., et al. GIM-TEC Adaptive Ionospheric Weather Assessment and Forecast System // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. 2013. Vol. 102. P. 329–340.
13. Ajello J.M., Evans J.S., Veibell V., et al. The UV Spectrum of the Lyman-Birge-Hopfield Band System of N₂ Induced by Cascading from Electron Impact // Journal of Geophysical Research: Space Physics. 2020. Vol. 125. Iss. 3. P. e2019JA027546. DOI:10.1029/2019JA027546.

14. Нестеров И.А., Падохин А.М., Андреева Е.С. и др. Моделирование задачи низкоорбитальной спутниковой УФ-томографии ионосферы // Вестник Московского университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2016. № 3. С. 90–99.
15. Павлов И.А., Падохин А.М. Реконструкция региональных распределений электронной концентрации в ионосфере по разнородным данным дистанционного зондирования // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2023. Т. 45, № 4. С. 95–108. DOI:10.26117/2079-6641-2023-45-4-95-108.

авторы

Куприянов Андрей Олегович

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
канд. техн. наук, доцент
 0009-0008-9222-5579

Морозов Дмитрий Андреевич

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
 0009-0002-1254-9095

Замогильный Дмитрий

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия
кафедра прикладной геодезии, геодезический факультет
 0009-0008-3242-1471

Поступила 05.08.2025. Принята к публикации 20.02.2026. Опубликовано 27.02.2026.



Local Monitoring of Ionospheric Parameters in the Polar Region Based on GNSS Observations

Andrey O. Kupriyanov¹✉, Dmitry A. Morozov¹, Dmitry Zamogilny¹

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ gnss@miigaik.ru

citation Kupriyanov AO, Morozov DA, Zamogilny D. Local Monitoring of Ionospheric Parameters in the Polar Region Based on GNSS Observations. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2026;70(1): 12–28. DOI:10.30533/GiA-2026-001.

keywords ionospheric parameter monitoring, local ionospheric model, polar ionosphere, total electron content, ionospheric scintillation

abstract The paper considers local modeling of the ionosphere in the polar region based on GNSS observations at permanent FAGS and IGS stations. The methodology of joint use of stations belonging to different networks for local monitoring of complete electronic content is presented. The results of monitoring in the area from 10° to 50° in longitude and from 65° to 75° in latitude for the time period 07/9/2020 to 07/16/2020 are presented. 8 GNSS observation stations located inside and in the vicinity of this area were used for monitoring. Local models of the spatial distribution of the vertical total electronic content in the form of Taylor series expansion parameters are obtained. The average square error for the central point of the model averaged 0.12 TECU, and the maximum value was 0.16 TECU. During the time period under review, intense ionospheric disturbances were observed, expressed in a sharp change in the total electronic content, which was previously associated with the passage of an auroral oval through the region under consideration. To confirm this hypothesis, data from the DMSP-F18 spacecraft was analyzed and it was found that during the observation period of the disturbances, the auroral oval passed directly through the region under consideration and a high intensity of disturbances was observed. It is determined that during the passage of an auroral disturbance, the variability of the vertical total electronic content increases by an average of 4.9 times.

references 1. Solovyov KV, Shaydulín ZF. Uovershenstvovannyi algoritm rascheta parametrov ionosfery Arkticheskoi zony [Advanced Algorithm for Calculating Ionosphere Parameters Arctic Zone]. *Nauchnaya Mysl'*. 2018;4(2(28)): 135–140. (In Russian).

2. Dem'yanov VV, Yasyukevich YuV, Kashkina TV, et al. Eksperimental'nye nablyudeniya uskoreniya fazy nesushchei v usloviyakh polyarnoi ionosfery [Experimental Observations of Carrier Phase Acceleration under Polar Ionospheric Conditions]. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2016;61(10): 946–951. (In Russian). DOI:10.7868/S0033849416100089.
3. Papyrin VV, Sidorov VK. Problemy organizatsii korotkovolnovoi radiosvyazi v Arktike i vozmozhnye puti ikh resheniya [Problems of Organization of Shortwave Radio Communications in the Arctic and Possible Ways of Their Solution]. *Scientific and Analytical Journal "Vestnik Saint-Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia"*. 2020;1: 1–4. (In Russian).
4. Kuleshov IA, Solozobov SA, Shevchenko VV. Problemy radiosvyazi v Arktike [Problems of Radio Communication in the Arctic]. *Means of Communication Equipment*. 2018;3(143): 21–31. (In Russian).
5. Kuz'michev AP. Problemy organizatsii svyazi s trudnodostupnymi i polyarnymi stantsiyami [Problems of Organizing Communications with Remote and Polar Stations]. *Russian Polar Researches*. 2014;3(17): 24–27. (In Russian).
6. Hernández-Pajares M, Juan JM, Sanz J, et al. The IGS VTEC Maps: A Reliable Source of Ionospheric Information since 1998. *Journal of Geodesy*. 2009;83: 263–275. DOI:10.1007/s00190-008-0266-1.
7. Abdelazeem M, Celik RN, El-Rabbany A. An Enhanced Real-Time Regional Ionospheric Model Using IGS Real-Time Service (IGS-RTS) Products. *Journal of Navigation*. 2016;69(3): 521–530. DOI:10.1017/S0373463315000740.
8. Liu H, Ren X, Xu G. Investigating the Performance of IGS Real-Time Global Ionospheric Maps under Different Solar Conditions. *Remote Sensing*. 2023;15(19): 4661. DOI:10.3390/rs15194661.
9. Shepel' VI, Ergaliev DS, Tulegulov AD. Sravnitel'nyi analiz global'nykh navigatsionnykh sputnikovyykh system [Comparative Analysis of Global Navigation Satellite Systems]. *Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium*. In 2 vols. Vol. 1. Penza: PSU; 2012: 469–470. (In Russian).
10. Wu Q, Zhang P, Sun M, et al. Performance Evaluation of Gims Released by Different IGS Ionosphere Associate Analysis Centers in Ionospheric Constrained Single-Frequency Precise Point Positioning. *Advances in Space Research*. 2021;68(12): 4834–4856. DOI:10.1016/j.asr.2020.12.006.
11. Montenbruck O, Hauschild A, Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation Using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. *Navigation*. 2014;61(3): 191–201.
12. Gulyaeva TL, Arian F, Hernandez-Pajares M, et al. GIM-TEC Adaptive Ionospheric Weather Assessment and Forecast System. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2013;102: 329–340.
13. Ajello JM, Evans JS, Veibell V, et al. The UV Spectrum of the Lyman-Birge-Hopfield Band System of N₂ Induced by Cascading from Electron Impact. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*. 2020;125(3): e2019JA027546. DOI:10.1029/2019JA027546.
14. Nesterov IA, Padokhin AM, Andreeva ES, et al. Modelirovanie zadachi nizkoorbital'noi sputnikovoi UF-tomografii ionosfery [Modeling the Problem of Low-Orbital Satellite UV-Tomography of the Ionosphere]. *Moscow University Physics Bulletin*. 2016;3: 90–99. (In Russian).
15. Pavlov IA, Padokhin AM. Rekonstruktsiya regional'nykh raspredelenii elektronnoi kontsentratsii v ionosfere po raznorodnym dannym distantsionnogo zondirovaniya [Reconstruction of Regional Distributions of Electron Density in the Ionosphere from Heterogeneous Remote Sensing Data]. *Bulletin KRASEC. Physical and Mathematical Sciences*. 2023;4: 95–108. (In Russian). DOI:10.26117/2079-6641-2023-45-4-95-108.

authors **Andrey O. Kupriyanov**

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy
 PhD in Engineering

 0009-0008-9222-5579

Dmitry A. Morozov

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy

 0009-0002-1254-9095

Dmitry Zamogilny

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
Department of Applied Geodesy, Faculty of Geodesy

 0009-0008-3242-1471

Submitted: August 05, 2025. Accepted: February 20, 2026. Published: February 27, 2026.