



УДК 551.510.62

<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.78>

Оценка применимости методики уточнения ионосферного запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем при одночастотных измерениях

Д. А. Каравацкий, С. Н. Колесник, В. И. Сажин*

Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся дополнительные результаты по оценке применимости методики уточнения величины ионосферного запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) при одночастотных измерениях для сети удаленных приемников по данным, получаемым на опорном приемнике, расположенном в центре сети. При расчете ионосферного запаздывания используется глобальная модель ионосферы IRI, корректируемая на текущую ситуацию по значениям критической частоты, полученным при измерениях на станции вертикального зондирования ионосферы. Для двух цепочек выбранного направления расположения подионосферных точек траекторий сигналов ГНСС в окрестности опорного приемника – долготной и широтной – оценивается в конкретных условиях величина пространственного радиуса эффективного уточнения ионосферного запаздывания. Рассмотрена возможность развития методики за счет применения для коррекции модели ионосферы на текущую ситуацию данных по критической частоте, получаемых на основе измерения разности ионосферных запаздываний сигналов от двух навигационных спутников, подионосферные точки траекторий которых находятся близко к опорному приемнику. Проведено моделирование по определению критической частоты при расположении двух подионосферных точек траекторий сигналов ГНСС в окрестности опорного приемника, расположенного в г. Москве. При сравнении с данными измерения критической частоты на станции вертикального зондирования в Москве средняя абсолютная ошибка для всех моментов времени по выполненным определениям составила приблизительно 0,6 МГц, величина относительной ошибки равна 0,06.

Ключевые слова: атмосфера Земли, ГНСС, модель ионосферы, ионосферное запаздывание сигналов, полное электронное содержание, критическая частота.

Благодарности. Выражаем признательность М. В. Тинину за внимание к подготовке статьи и участие в обсуждении полученных результатов. Работа выполнена в рамках госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (задание № FZZE-2026-0006).

Для цитирования: Каравацкий Д. А., Колесник С. Н., Сажин В. И. Оценка применимости методики уточнения ионосферного запаздывания сигналов глобальных навигационных спутниковых систем при одночастотных измерениях // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2026. Т. 57. С. 78–90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.78>

Applicability Assessment of the GNSS Ionospheric Delay Refinement Technique in Single-Frequency Measurements

D. A. Karavatsky, S. N. Kolesnik, V. I. Sazhin*

Irkutsk State University, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Additional results are presented to assess the applicability of a methodology for refining the ionospheric delay of global navigation satellite systems (GNSS) signals in single-frequency measurements for a network of remote receivers using data obtained at a reference receiver located at the center of the network. The ionospheric delay is calculated using the IRI global ionospheric model, adjusted for the current situation using the critical frequency values obtained during measurements at a vertical sounding (VS) station. For two chains of selected directions of sub-ionospheric points of GNSS signal trajectories in the vicinity of the reference receiver – longitudinal and latitudinal – the spatial radius of the effective ionospheric delay refinement is estimated under specific conditions. The feasibility of developing a methodology by using critical frequency data, obtained by measuring the difference in ionospheric signal delays from two navigation satellites (NS) with sub-ionospheric trajectory points located close to a reference receiver, to correct the ionospheric model for the current situation is considered. Modeling was conducted to determine the critical frequency for two sub-ionospheric GNSS signal trajectory points located near a reference receiver located in Moscow. When compared with critical frequency measurement data from the Moscow VS station, the average absolute error for all time points in the determinations was approximately 0.6 MHz, with a relative error of 0.06.

Keywords: Earth's atmosphere, GNSS, ionospheric model, ionospheric signal delay, total electron content, critical frequency.

For citation: Karavatsky D.A., Kolesnik S.N., Sazhin V.I. Applicability Assessment of the GNSS Ionospheric Delay Refinement Technique in Single-Frequency Measurements. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2026, vol. 57, pp. 78-90. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2026.57.78> (in Russian)

Введение

Изменения в атмосфере Земли, вариации ее параметров отражают протекание основных процессов, проходящих в недрах нашей планеты. В то же время атмосфера чутко реагирует на потоки солнечной и космической плазмы, идущие по направлению к Земле, приводящие к ряду существенных явлений на ее поверхности. Поэтому изучение физики атмосферы Земли имеет важное значение для жизнедеятельности населения планеты.

Важной частью атмосферы Земли является протяженная ионизированная область – ионосфера. Она защищает живые организмы от ультрафиолетового излучения Солнца и отражает наземные радиоволны, позволяя использовать дальнюю радиосвязь и разрабатывать способы раннего оповещения и предупреждения об экологически экстремальных событиях. Однако нестабильность и изменчивость состояния ионосферы затрудняют применение этих способов и приводят к необходимости проведения дополнительных исследований ионосферы и совершенствования способов использования ионосферного распространения радиоволн.

Новый современный этап исследований по изучению ионосферы Земли открыло применение глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) [Афраймович, Перевалова, 2006; Ionospheric ... , 2013; Yasyukevich,

Mylnikova, Polyakova, 2014; Демьянов, Ясюкевич, 2014; Maltseva, 2018]. Разработке на этой основе методик предсказания возникновения экстремальных атмосферных и сейсмических событий посвящен ряд работ [Astafyeva, Rolland, Sladen, 2014; Real-Time ... , 2017; Investigation ... , 2021]. Надо отметить, что получение информации об ионосфере из данных о сигналах ГНСС, принимаемых на земной поверхности, требует решения обратной задачи, затрудняемой тем, что изменение параметров сигналов сложно однозначно связать с какой-то конкретной вертикальной областью атмосферы. Выделение вклада ионосферы в эти изменения оценивают через величину запаздывания сигналов, связанного с замедлением скорости распространения сигналов в ионосфере по сравнению с вакуумом. Это запаздывание называют ионосферным. Оно вносит одну из основных погрешностей в позиционирование, выполняемое одночастотными приемниками сигналов ГНСС. Несмотря на наличие некоторых методик ее определения [Иванов, Горбачев, Холмогоров, 2015; Смирнов, Смирнова, 2019; Ясюкевич, Веснин, Куркин, 2020], остается достаточно актуальной разработка новых методик, приводящих к повышению точности вычисления ионосферного запаздывания сигналов.

Оценка степени уточнения значения ионосферного запаздывания сигналов навигационных спутников (НС) на модельных трассах

В работе [Differential ... , 2023] предложена методика расчета ионосферного запаздывания сигналов ГНСС для сети удаленных приемников по данным, получаемым на опорном приемнике, расположенном в центре сети. В отличие от стандартной методики, применяемой в системе GPS, в ней используется глобальная модель ионосферы IRI¹. Для расчета значений вертикального полного электронного содержания (ПЭС) в подионосферных точках траекторий сигналов от НС модель корректируется на текущую ситуацию по значению критической частоты. Как показано в ряде работ (см., например, [Перевалова, Полякова, Зализовский, 2009]), изменения этого параметра оказывают наибольшее, определяющее влияние на значение вертикального ПЭС, по сравнению с другими параметрами высотного профиля электронной концентрации. После выявления значений вертикального ПЭС вычисляется величина ПЭС вдоль траектории сигнала – наклонного ПЭС с использованием аналитической формулы для фактора наклона траектории сигнала. Величина наклонного ПЭС и определяет в итоге значение ионосферного запаздывания сигнала.

Вначале для подионосферной точки траектории сигнала от НС, наиболее близко расположенной к опорному приемнику, которую также можно назвать опорной точкой, находится относительная разность корректирующего значения критической частоты и исходного ее значения, даваемого моделью. Для коррекции используются данные вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы на станции, расположенной вблизи опорного приемника. Это значение относительной разности используется каждый раз для коррекции

¹ International reference ionosphere. URL: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri2016_vitmo.php (дата обращения: 15.05.2021).

модели ионосферы по критической частоте при расчетах ионосферного запаздывания сигналов, которые принимаются опорным приемником от НС, с подионосферными точками траекторий, находящимися на более удаленных расстояниях от опорного приемника, чем ближайшая. При этом учитываются величины радиусов пространственной корреляции отклонений среднечасовых значений критической частоты ионосферы для конкретного дня от ее среднемесячных измеряемых значений в невозмущенных условиях [Semi-empirical ... , 1986].

Для оценки эффективности методики были выбраны в окрестности опорного приемника, расположенного вблизи г. Москвы, две цепочки расположения подионосферных точек траекторий сигналов ГНСС, ориентированные по долготе и по широте от г. Москвы. Ближайшая к опорному приемнику подионосферная точка траектории сигнала от НС совпадает для каждой цепочки по положению с г. Москвой. В работе [Каравацкий, Колесник, Сажин, 2024] рассчитаны значения вертикального ПЭС для широтной цепочки расположения подионосферных точек траекторий НС в момент времени в пункте Москва 13 LT, магнитно-спокойного дня 8 марта 2011 г. При коррекции модели ионосферы на текущую ситуацию использовались данные станции ВЗ для пункта Москва². В качестве измеряемых величин вертикального ПЭС для сравнения с расчетными значениями выбраны значения ПЭС, приводимые в картах Ionex [Schaer, Gurtner, Feltens, 1998]. Получено, что для данной широтной цепочки в рассматриваемый момент времени методика достаточно эффективна на расстояниях от опорной точки примерно до 470 км, обеспечивая уменьшение ошибки определения вертикального ПЭС относительно значений из карт чуть более чем в четыре раза. Величина наклонного ПЭС при расчетах по методике является прямо пропорциональной величине вертикального ПЭС, поэтому такое же соотношение соответствует и уменьшению относительной ошибки при определении величины ионосферного запаздывания.

В настоящей работе нами получен соответствующий график изменения величин ионосферного запаздывания сигналов, пересчитанных в расстояния, называемых обычно ионосферной поправкой к измеряемой дальности от приемника до НС. Для этого дополнительно были проведены расчеты факторов наклона траекторий сигналов по формуле [Schaer, 1999] и величин наклонного ПЭС в двух вариантах использования модели ионосферы. Этот график для значений ионосферной поправки приведен на рис. 1. Для демонстрации эффекта коррекции модели на текущую ситуацию приведена также кривая, полученная по исходной модели без коррекции. По горизонтальной оси на графике отложены расстояния от опорного приемника до подионосферных точек траекторий сигналов рассматриваемой широтной цепочки.

² Digital Ionogram Data Base. URL: <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php> (дата обращения: 15.05.2021).

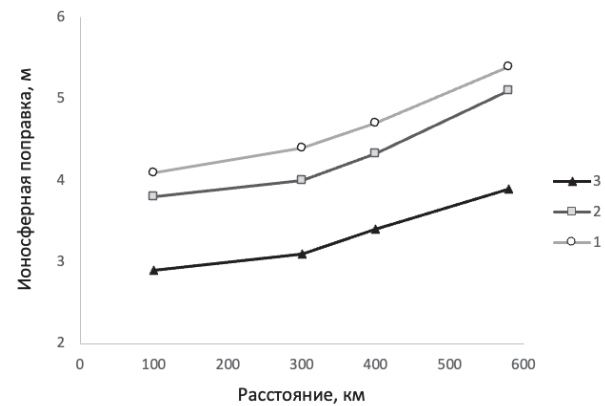


Рис. 1. Изменения абсолютных значений ионосферной поправки: кривая 1 – значения поправки для расчета ПЭС по картам; кривая 2 – значения для расчета ПЭС по скорректированной модели; кривая 3 – значения для расчета ПЭС по исходной модели

Из графика видно, что выполняемая в методике коррекция модели ионосферы для расчета ионосферной поправки уменьшает абсолютную ошибку исходной модели в данном случае примерно с величины 1,3 до 0,3 м относительно эталонных расчетов по картам, что составляет уменьшение относительной ошибки по сравнению со стандартной методикой более чем в четыре раза.

Далее в настоящей работе были рассчитаны значения вертикального ПЭС для долготной цепочки расположения подионосферных точек траекторий НС в другой момент времени в пункте Москва 11 LT того же дня 8 марта 2011 г. Этот момент времени соответствует более неоднородной ионосфере вдоль линии расположения удаленных от опорной подионосферных точек, чем момент времени 13 LT.

В табл. 1 приведены данные, используемые в методике при выполнении коррекции критической частоты в модели ионосферы для удаленных точек (УТ).

Таблица 1

Данные для коррекции модели ионосферы в опорной и удаленных точках

Пункт	Частота по модели (исходное), МГц	Корректирующее значение частоты, МГц	Разность между корректирующим значением и частотой по модели, МГц	Разность между корректирующим значением и частотой по модели, %
Москва	6,5	7,2 (данные ВЗ)	0,7	9,72
Л1 (первая УТ)	6,57	7,14	0,62	9,72
Л2 (вторая УТ)	6,63	7,27	0,64	9,72
Л3 (третья УТ)	6,69	7,34	0,65	9,72

В табл. 2 показаны полученные результаты определения величин вертикального ПЭС для опорной и удаленных точек по исходной и скорректированной моделям ионосферы относительно использования данных измерений ПЭС из карт Iоnех.

Таблица 2

Результаты определения величин вертикального ПЭС

Пункт	ПЭС по модели (исходное), TECu	ПЭС по модели (с коррекцией), TECu	ПЭС по картам, TECu	Δ ПЭС по модели (исходное) и ПЭС по картам, TECu	Δ ПЭС по модели (исходное) и ПЭС по картам, %	Δ ПЭС по модели (с коррекцией) и ПЭС по картам, TECu	Δ ПЭС по модели (с коррекцией) и ПЭС по картам, %
Москва	14,1	17,2	19,8	5,7	28,79	2,6	13,13
Л1	14,5	17,2	20	5,5	27,5	2,8	14
Л2	14,8	17,7	20,1	5,3	26,37	2,4	11,94
Л3	15,1	18	20,2	5,1	25,25	2,2	10,89

На рис. 2 представлен полученный по табл. 2 график изменения с удалением от опорной точки величин относительного отличия расчетных значений ПЭС для исходной и скорректированной моделей в сравнении со значениями ПЭС из карт. По вертикальной оси представлены отличия в определении ПЭС по модели относительно значений по картам: для исходной модели – верхняя кривая на графике, для скорректированной модели – нижняя кривая. По горизонтальной оси положение кружков соответствует величинам расстояний подионосферных точек от опорной.

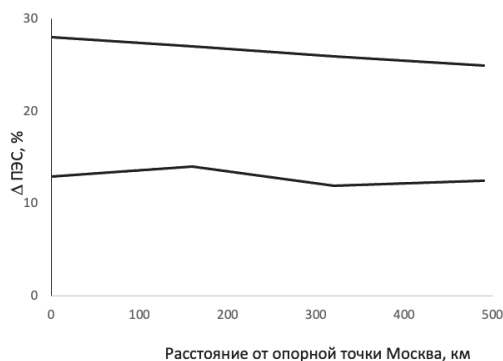


Рис. 2. Изменения относительного отличия расчетных значений ПЭС по модели в сравнении с ПЭС по картам

Можно видеть, что для этого момента времени с более неоднородной ионосферой вдоль линии расположения удаленных подионосферных точек при сохранении величины пространственного радиуса действия рассматриваемой методики эффективность ее уменьшилась. Снижение относительной ошибки при использовании скорректированной модели ионосферы по сравнению с использованием исходной модели составляет величину только около двух раз. Таким образом, можно сделать вывод, что усиление неоднородности ионосферы вдоль цепочки существенно уменьшает величину относительного уточнения значений вертикального ПЭС в удаленных точках и, соответственно, величину достигаемой степени относительного уточнения ионосферного запаздывания сигналов.

Апробация способа определения в методике значений критической частоты по данным приема сигналов НС для модельных трасс

При оценке применимости методики уточнения ионосферного запаздывания для коррекции модели ионосферы использованы данные по критической частоте, получаемые на станции ВЗ. В рамках развития методики рассматривается возможность получения корректирующей информации из более доступных и проще выполнимых измерений характеристик сигналов в ГНСС. Нами в работе [Каравацкий, Колесник, Сажин, 2025] предложено использовать с этой целью разности ионосферных запаздываний сигналов от двух НС, определяемые из измерений значений псевдодальностей, усредненных за часовой период. В этой работе проведена апробация указанного способа определения корректирующих значений критической частоты для конфигурации спутников, используемой при приеме сигналов ГНСС одночастотным приемником с известными координатами местоположения в г. Иркутске. По выполненным двенадцати определениям значений критической частоты средняя абсолютная ошибка по сравнению с данными ВЗ составила приблизительно 0,6 МГц, а величина относительной ошибки равна 0,07.

Для получения дополнительных данных по апробации способа в настоящей работе проведено моделирование по определению критической частоты на модельных трассах, рассмотренных выше, при расположении двух подионосферных точек траекторий сигналов ГНСС в окрестности опорного приемника, место положения которого имеет то же значение долготы, что и г. Москва, а по широте сдвинуто по московскому меридиану на один градус к экватору. При таком положении приемника ближайшая к нему вдоль меридиана подионосферная точка Р1 совпадает с г. Москвой. Вторая подионосферная точка Р2 выбрана вдоль параллели г. Москвы на восток, с долготой большей на 2,5 градуса, чем у г. Москвы. Расстояние от приемника до первой точки составляет приблизительно 110 км, от приемника до второй – 165 км, расстояние между точками равно 190 км. Рассмотрены моменты времени 9, 11, 13 LT в пункте Москва для 8 марта 2011 г. При определении критической частоты рассчитанные для исходных параметров модели ионосферы разности ионосферных запаздываний (или разности поправок к дальности) сигналов от выбранной пары НС сравниваются с найденным значением разности из проводимых измерений. Далее значения критических частот в модели ионосферы уменьшаются и увеличиваются с одинаковым относительным шагом, для каждого шага проводится новый расчет ионосферных запаздываний этих сигналов. Из получаемого набора значений расчетной разности по модели ионосферы выбирается то, которое обеспечивает наилучшую близость к измеряемому значению. В табл. 3 приведены полученные результаты расчетов для сигналов НС с подионосферной точкой траектории Р1 в момент времени 13 LT. Для сокращения показаны результаты только для увеличения исходного значения критической частоты с некоторым переменным шагом.

Таблица 3

Результаты расчетов для НС с подионосферной точкой траектории P1

Подionoсферная точка	Частота (модель)	Частота +10 %	Частота +15 %	Частота +20 %	Частота +30 %
P1	6,374	7,011	7,330	7,649	8,286
ПЭС верт.	14,0	16,8	18,3	19,9	23,2
ПЭС накл.	15,708	18,850	20,533	22,328	26,030
Фактор наклона	1,122	1,122	1,122	1,122	1,122
ПЭС накл. (карты Ionex)	20,135	20,135	20,135	20,135	20,135
Ионосферное запазд. Модель IRI (нс)	9,378	11,254	12,259	13,331	15,541
Ионосферная поправка. Модель (м)	2,813	3,376	3,678	3,999	4,662
Ионосферное запазд. Карты Ionex (нс)	12,022	12,022	12,022	12,022	12,022
Ионосферная поправка. Карты (м)	3,606	3,606	3,606	3,606	3,606

Аналогичные данные для сигналов НС с подионосферной точкой траектории P2 показаны в табл. 4.

Таблица 4

Результаты расчетов для НС с подионосферной точкой траектории P2

Подionoсферная точка	Частота (модель)	Частота +10 %	Частота +15 %	Частота +20 %	Частота +30 %
P2	6,391	7,030	7,350	7,669	8,308
ПЭС верт.	14,0	16,9	18,4	20,0	23,3
ПЭС накл.	18,0	20,398	22,209	24,140	28,123
Фактор наклона	1,207	1,207	1,207	1,207	1,207
ПЭС накл. (карты Ionex)	21,726	21,726	21,726	21,726	21,726
Ионосферное запазд. Модель IRI (нс)	10,747	12,179	13,259	14,412	16,791
Ионосферная поправка. Модель (м)	3,224	3,654	3,978	4,324	5,037
Ионосферное запазд. Карты Ionex (нс)	12,971	12,971	12,971	12,971	12,971
Ионосферная поправка. Карты (м)	3,891	3,891	3,891	3,891	3,891

Далее были проведены расчеты по определению разностей ионосферных запаздываний и поправок для сигналов от двух рассматриваемых спутников и сравнению этих разностей со значениями, полученными по данным карт Ionex. В табл. 5 приведены соответствующие результаты.

Анализируя данные табл. 5, получаем, что минимальное относительное отличие разностей ионосферной поправки 0,2 % соответствует значению критической частоты в модели +10 % от исходного. В столбце табл. 3 с увеличением исходного значения частоты в модели на 10 % выбираем значение критической частоты для подионосферной точки P1 7,011 МГц. Значение критической частоты по данным станции ВЗ в точке P1 для рассматриваемого момента времени было 7,625 МГц. Таким образом, абсолютная ошибка

определения частоты составляет в данном случае 0,61 МГц, а относительная ошибка равна примерно 0,08. Естественно, с учетом небольшого расстояния приемника от точки P1, эти же величины ошибок определения критической частоты можно с небольшим приближением отнести и к точке расположения приемника.

Таблица 5

Сравнение расчетов для двух сигналов с точками траекторий P1 и P2

Значения критической частоты в модели ионосферы	Исходное значение	Частота +10 %	Частота +15 %	Частота +20 %	Частота +30 %
Разность запаздывания между сигналами с п/ион-ми точками P1 и P2 по модели (нс)	1,368	0,925	1,001	1,082	1,249
Разность поправки между сигналами с P1 и P2 по модели (м)	0,411	0,277	0,300	0,325	0,375
Разность запаздывания между сигналами по картам (нс)	0,950	0,950	0,950	0,950	0,950
Разность поправки между сигналами по картам (м)	0,285	0,285	0,285	0,285	0,285
Разность разностей запаздывания по модели и по картам (нс)	0,419	0,025	0,051	0,132	0,300
Разность разностей поправки по модели и по картам (м)	0,126	0,008	0,015	0,040	0,090
Относительное отличие разности разностей поправки по модели и по картам (%)	3,351	0,200	0,409	1,059	2,399

Для этого же увеличения критической частоты +10 % по рассчитанным данным для точки P2 в табл. 4 также находим соответствующее определенное значение критической частоты 7,03 МГц. Это значение, вследствие небольшого расстояния между точками P1 и P2, можно приближенно принять за величину критической частоты в точке P1 и также сравнить с данными ВЗ в точке P1. Получаем, что абсолютная ошибка определения частоты составляет в данном случае 0,61 МГц, а относительная ошибка равна примерно 0,08. Аналогичные определения текущих значений критической частоты были выполнены и для двух других моментов времени 11 LT и 09 LT. В целом для трех рассмотренных моментов времени по шести определениям значений критической частоты средняя абсолютная ошибка составила приблизительно 0,6 МГц, а величина средней относительной ошибки равна 0,06.

Заключение

Проведено моделирование для оценки эффективности методики уточнения величины ионосферного запаздывания сигналов ГНСС на выбранных двух цепочках расположения подионосферных точек траекторий сигналов ГНСС, ориентированных по долготе и широте от положения опорного приемника. Для широтной цепочки в полуденный момент времени показано, что уменьшение относительной ошибки по сравнению со стандартной методикой, на удалении подионосферных точек от опорной точки до 470 км, составляет более четырех раз. Для долготной цепочки в другой момент време-

ни, который соответствует более неоднородной ионосфере вдоль цепочки, показано, что данная методика уточнения ионосферного запаздывания менее эффективна, уменьшая относительную ошибку определения величины ионосферного запаздывания для удаленных точек в указанном выше диапазоне расстояний от опорной точки, приблизительно лишь в два раза по сравнению со стандартной методикой.

Приведенные примеры использования методики показывают перспективность ее применения для повышения точности расчета ионосферного запаздывания сигналов ГНСС при одночастотных измерениях. Вместе с тем для получения более представительных количественных оценок эффективности необходимо проведение подобного моделирования ее применения для большего набора трасс распространения сигналов от НС и различных ионосферных условий их распространения.

Проведенная апробация способа получения корректирующей информации по критической частоте ионосферы из измерений характеристик сигналов в ГНСС на модельных трассах показала, что полученные значения средних абсолютной и относительной ошибок практически совпадают со значениями, полученными для ошибок при определении критической частоты данным способом из наблюдений сигналов НС в Иркутске и, таким образом, могут в целом, для рассмотренных двух ситуаций, характеризовать достигаемую точность определения частоты. Поскольку при этом величины средних абсолютной и относительной ошибок сравнительно невелики, они, на наш взгляд, показывают, что данный метод определения текущих значений критической частоты для коррекции ионосферной модели может быть применим в методике уточнения ионосферного запаздывания сигналов ГНСС по данным опорного приемника, после проведения дальнейшей более широкой проверки его эффективности в различных геофизических условиях.

Список литературы

- Афраймович Э. Л., Первалова Н. П.* GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : Ин-т солнечно-земной физики СО РАН : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 479 с.
- Демьянов В. В., Ясюкевич Ю. В.* Механизмы воздействия нерегулярных геофизических факторов на функционирование спутниковых радионавигационных систем. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2014. 349 с.
- Иванов В. Б., Горбачев О. А., Холмогоров А. А.* Дифференциально-временная коррекция ошибок позиционирования для спутниковых радионавигационных систем // Новости навигации. 2015. № 2. С. 17–23.
- Каравацкий Д. А., Колесник С. Н., Сажин В. И.* К развитию методики уточнения ионосферного запаздывания сигналов ГНСС по данным опорного приемника // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : материалы XXXI Междунар. симп. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2025. Конференция Е. С. 31–34.
- Каравацкий Д. А., Колесник С. Н., Сажин В. И.* Оценка применимости методики уточнения ионосферного запаздывания сигналов ГНСС при одночастотных измерениях // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы : материалы XXX Междунар. симп. Томск : Изд-во ИОА СО РАН, 2024. Конференция Е. С. 58–62.
- Первалова Н. П., Полякова А. С., Зализовский А. В.* Суточные вариации «вертикального» полного электронного содержания в спокойных геомагнитных условиях // Солнечно-земная физика. 2009. Вып. 14. С. 82–88.

Смирнов В. М., Смирнова А. В. Зондирование ионосферы Земли над морскими акваториями // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16, № 5. С. 327–335. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335>

Ясюкевич Ю. В., Веснин А. М., Куркин В. И. Глобальные навигационные спутниковые системы как средство коррекции ионосферной ошибки радиотехнических средств: проблемы и перспективы // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2020. Т. 63, № 3. С. 195–209.

Astafyeva E., Rolland L. M., Sladen A. Strike-slip earthquakes can also be detected in the ionosphere // Earth and Planetary Science Letters. 2014. Vol. 405. P. 180–193. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.024>

Differential correction of ionospheric delay of GNSS signals in single-frequency measurements / D. A. Karavatsky, S. N. Kolesnik, M. E. Moskvitin, V. I. Sazhin // Proc. SPIE 12780, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics (17 October 2023). 127807F. <https://doi.org/10.1117/12.2690780>

Investigation of Ionospheric Response to June 2009 Sarychev Peak Volcano Eruption / N. Shestakov, A. Orlyakovskiy, N. Perevalova [et al.] // Remote Sensing. 2021. Vol. 13. P. 638. <https://doi.org/10.3390/rs13040638>.

Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS / V. Kunitsyn, E. Andreeva, I. Nesterov, A. Padokhin // Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications. Ed. by S. Jin. IntechOpen, 2013. <https://doi.org/10.5772/54589>.

Maltseva O. Use of TEC to determine foF2: differences and similarities at high and low latitudes // Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS '18). New York: Association for Computing Machinery, 2018. P. 65–72. <https://doi.org/10.1145/3278161.3278172>

Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration / G. Savastano, A. Komjathy, O. Verkhoglyadova [et al.] // Scientific Reports. 2017. Vol. 7, N 1. P. 46607. <https://doi.org/10.1038/srep46607>

Schaer S. Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system: Dr. sci. diss. Univ. Bern, 1999.

Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The ionosphere map exchange format Version 1 // Proc. IGS AC Workshop, Darmstadt, 1998. P. 233–247.

Semi-empirical model of the ionosphere for a wide range of geophysical conditions / V. M. Polyakov, V. E. Sukhodolskaya, M. K. Ivetskaya [et al.]. Moscow: MTsD-B, 1986. 136 p.

Yasyukevich Yu. V., Mylnikova A. A., Polyakova A. S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS data // Results in Physics. 2015. Vol. 5. P. 32–33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>

References

Afraimovich E. L., Perevalova N. P. *GPS-monitoring verkhney atmosfery Zemli* [GPS monitoring of the Earth's upper atmosphere]. Irkutsk, Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS: GU NTs RVH VSNTs SB RAMS, 2006. 479 p. (in Russian)

Dem'yanov V.V., Yasyukevich Yu.V. *Mekhanizmy vozdеistviya neregulyarnykh geofizicheskikh faktorov na funktsionirovanіe sputnikovyykh radionavigatsionnykh sistem: monografiya* [Mechanisms of influence of irregular geophysical factors on the functioning of satellite radio navigation systems]. Irkutsk, ISU Publ., 2014, 349 p. (in Russian)

Ivanov V.B., Gorbachev O.A., Kholmogorov A.A. Differentsialno-vremennaya korrektsiya oshibok pozitsionirovaniya dlya sputnikovyykh radionavigatsionnykh system [Differential-time correction of positioning errors for satellite radio navigation systems]. *Novosti navigatsii* [Navigation News], 2015, no. 2, pp. 17-23. (in Russian)

Karavackij D.A., Kolesnik S.N., Sazhin V.I. Ocenka primenimosti metodiki utochneniya ionosfernogo zapazdyvaniya signalov GNSS pri odnochastotnykh izmereniyah [Towards the development of a methodology for refining the ionospheric delay of GNSS signals using reference receiver data]. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery* [Atmospheric and Oceanic Optics. Atmospheric Physics]. Proceedings of the XXXI International Symposium. Tomsk, IOA SB RAS Publ., 2024, Conf. E, pp. 58-62. (in Russian)

Karavackij D. A., Kolesnik S.N., Sazhin V.I. K razvitiy metodiki utochneniya ionosfernogo zapazdyvaniya signalov GNSS po dannym opornogo priemnika [Evaluation of the applicability of the methodology for refining the ionospheric delay of GNSS signals in single-frequency measurements]. *Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery* [Atmospheric and Oceanic Optics. Atmospheric Physics]. Proceedings of the 30th International Symposium]. Tomsk, IOA SB RAS Publ., 2025, Conf. E, pp. 31-34. (in Russian)

Perevalova N.P., Polyakova A.S., Zalizovskii A.V. Sutochnye variatsii "vertikalnogo" polnogo elektronno go soderzhaniya v spokojnykh geomagnitnykh usloviyakh [Diurnal variations of the "vertical" total electron content in quiet geomagnetic conditions]. *Solnechno-zemnaya fizika* [Solar-Terrestrial Physics], 2009, iss. 14, pp. 82-88. (in Russian)

Smirnov V.M., Smirnova A.V. Zondirovanie ionosfery Zemli nad morskimi akvatoriyami [Probing the Earth's ionosphere over marine areas]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems of remote sensing of the Earth from space], 2019, vol. 16, no. 5, pp. 327-335. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-327-335>. (in Russian)

Yasyukevich Yu.V., Vesnin A.M., Kurkin V.I. Globalnye navigatsionnye sputnikovye sistemy kak sredstvo korrektsii ionosfernoi oshibki radiotekhnicheskikh sredstv: problemy i perspektivy [Global navigation satellite systems as a means of correcting ionospheric errors in radio engineering equipment: problems and prospects]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Radiofizika* [News of higher educational institutions. Radiophysics], 2020, vol. 63, no. 3, pp. 195-209. (in Russian)

Astafyeva E., Rolland L.M., Sladen A. Strike-slip earthquakes can also be detected in the ionosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, vol. 405, pp. 180-193. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.08.024>

Karavatsky A., Kolesnik S.N., Moskvitin M.E., Sazhin V.I. Differential correction of ionospheric delay of GNSS signals in single-frequency measurements. *Proc. SPIE, 29th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*, 2023, 127807F. <https://doi.org/10.1117/12.2690780>

Shestakov N., Orlyakovskiy A., Perevalova N. et al. Investigation of Ionospheric Response to June 2009 Sarychev Peak Volcano Eruption. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, pp. 638. <https://doi.org/10.3390/rs13040638>

Kunitsyn V., Andreeva E., Nesterov I., Padokhin A. Ionospheric Sounding and Tomography by GNSS. *Geodetic Sciences – Observations, Modeling and Applications*. Ed. by S. Jin. IntechOpen, 2013. <https://doi.org/10.5772/54589>.

Maltseva, O. Use of TEC to determine foF2: differences and similarities at high and low latitudes. *Proceedings of the Seventh International Conference on Telecommunications and Remote Sensing (ICTRS '18)*. New York, Association for Computing Machinery, 2018, pp. 65-72. <https://doi.org/10.1145/3278161.3278172>

Savastano G., Komjathy A., Verkhoglyadova O. [et al.]. Real-Time Detection of Tsunami Ionospheric Disturbances with a Stand-Alone GNSS Receiver: A Preliminary Feasibility Demonstration. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 46607. <https://doi.org/10.1038/srep46607>

Schaer S. *Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system*. Doc. sci diss. Univ. Bern, 1999.

Schaer S., Gurtner W., Feltens J. IONEX: The ionosphere map exchange format Version 1. *Proc. IGS AC Workshop*. Darmstadt, 1998, pp. 233-247.

Polyakov V.M., Sukhodol skaya V.E., Ivelskaya M.K., Sutyryna G.E., Dubovskaya G.V., Buzunova M.Yu. *Semi-empirical model of the ionosphere for a wide range of geophysical conditions*. Moscow, MTsD-B, 1986, 136 p.

Yasyukevich Yu.V., Mylnikova A.A., Polyakova A.S. Estimating the total electron content absolute value from the GPS/GLONASS. *Results in Physics*, vol. 5, pp. 32-33. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.12.006>.

Сведения об авторах

Караватский Дмитрий Андреевич
магистрант, кафедра радиофизики
и радиоэлектроники

Information about the authors

Karavatsky Dmitry Andreevich
Master's Student
Department of Radiophysics and

*Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: karavackijd@bk.ru*

Колесник Сергей Николаевич

*кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры радиофизики
и радиоэлектроники
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: kyf_2001@mail.ru*

Сажин Виктор Иванович

*доктор физико-математических наук,
профессор кафедры радиофизики
и радиоэлектроники
Иркутский государственный университет
Россия, 664003, г. Иркутск, ул. К. Маркса, 1
e-mail: visazhin47@mail.ru*

*Radioelectronics
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: karavackijd@bk.ru*

Kolesnik Sergey Nikolaevich

*Candidate of Sciences (Physics and
Mathematics), Associate Professor,
Department of Radiophysics and
Radioelectronics
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: kyf_2001@mail.ru*

Sazhin Victor Ivanovich

*Doctor of Sciences (Physics and Mathematics),
Professor of the Department of Radiophysics
and Radioelectronics
Irkutsk State University
1, K. Marx st., Irkutsk, 664003,
Russian Federation
e-mail: visazhin47@mail.ru*

Код научной специальности: 1.6.18

Статья поступила в редакцию 25.04.2025; одобрена после рецензирования 09.09.2026, принята к публикации 14.09.2026
The article was submitted April, 25, 2025; approved after reviewing September, 09, 2026; accepted for publication September, 14, 2026