

## УПРОЩЕННАЯ ОЦЕНКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕКУЩИХ ЗНАЧЕНИЙ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ ПО ИЗМЕРЕНИЯМ РАЗНОСТИ ИОНОСФЕРНЫХ ЗАПАЗДЫВАНИЙ СИГНАЛОВ ОТ ДВУХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВ ОДНОЧАСТОТНЫМ ПРИЕМНИКОМ

**А.С. Тимофеев, Л.А. Непомнящих, В.И. Сажин**

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия  
wernayk@ya.ru

## SIMPLIFIED ESTIMATE OF THE TECHNIQUE FOR DETERMINING CURRENT VALUES OF CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERE, USING MEASUREMENTS OF THE DIFFERENCE IN IONOSPHERIC SIGNAL DELAYS FROM TWO NAVIGATION SATELLITES MADE BY A SINGLE-FREQUENCY RECEIVER

**A.S. Timofeev, L.A. Nepomnyashchikh, V.I. Sazhin**

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia  
wernayk@ya.ru

**Аннотация.** Проведена оценка эффективности методики уточнения критических частот в небольшом пространственном регионе. Исходными значениями являются величины критических частот, определяемые из модели IRI. Для их уточнения проводится фитирование значений критических частот в модели до приближения расчетной разности ионосферных запаздываний сигналов от двух навигационных спутников к разности, вычисляемой для значений полного электронного содержания, определяемых из карт IONEX. Выполнено сравнение восьми уточненных значений критических частот с измеренным при вертикальном зондировании ионосферы в близко расположенном пункте величиной. Получено среднее относительное значение их отличия от измеренного в несколько процентов, что свидетельствует о возможности практической реализации методики в условиях спокойной регулярной ионосферы.

**Ключевые слова:** критическая частота, уточнение, модель ионосферы, навигационные спутники, ионосферное запаздывание сигналов.

**Annotation.** An assessment was made of the effectiveness of the method for the refinement of critical frequencies in a small spatial region. The initial values are the critical frequency values determined from the IRI model. To clarify them, the values of critical frequencies in the model are fitted until the estimated difference of the ionospheric delays of signals from two navigation satellites to the difference calculated for the values of the total electronic content determined from the IONEX maps. The eight adjusted values of the critical frequencies are compared with those measured with the vertical sounding of the ionosphere at a closely spaced point. The average relative value of their difference from the one measured in several percent was obtained, which indicates the possibility of practical implementation of the technique in a calm regular ionosphere.

**Keywords:** critical frequency, clarification, model of the ionosphere, navigation satellites, ionospheric signal delay.

Уточнение текущих значений критической частоты ионосферы может эффективно использоваться для коррекции среднемесячных моделей ионосферы на текущую ситуацию, что имеет важное значение для повышения эффективности работы различных радиосредств, сигналы которых отражаются от ионосферы или проходят через нее. В качестве оперативной информации для проведения коррекции используются данные вертикального зондирования ионосферы или данные измерений параметров сигнала при распространении на наземных ионосферных трассах [Golygin et al., 2007] и на транс-ионосферных трассах [Смирнов и др., 2008]. Широкие возможности получения информации об ионосфере представляют в настоящее время и измерения полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы, выполняемые в глобальных навигационных спутниковых системах (ГНСС). В связи с этим, появились работы по коррекции моделей ионосферы с использованием данных по ПЭС, получаемых в этих системах [Мальцева и др., 2005; Afraimovich, Yasukevich, 2008; Котова и др., 2017]. В этих работах осуществляется коррекция моделей, уточняющая описание ими ионосферы в большом пространственном регионе. Такая коррекция может быть определена как региональная. При этом в качестве

корректирующей информации используются данные о ПЭС ионосферы, определяемом при двухчастотных измерениях на специализированных приемниках.

В силу большей простоты и широкой распространенности одночастотных приемников сигналов ГНСС вызывает интерес возможность использования их данных для коррекции модели ионосферы. Однако, определение ионосферного запаздывания сигнала от навигационного спутника (НС) с использованием одночастотного приемника является сложной задачей. В ряде работ [Шебшаевич и др., 1993] с этой целью используются измерения для большого числа НС, и за счет избыточности навигационных данных при постоянном местоположении приемника удается определить вклад ионосферы в общую задержку сигнала. Естественно, что такие данные трудно использовать для проведения коррекции модели ионосферы на текущую ситуацию. Локальная (в небольшой пространственной области) коррекция модели ионосферы возможна по измерениям абсолютных значений ПЭС одночастотным приемником сигналов НС [Мыльников и др., 2017], однако, временной интервал обработки данных составляет при этом не менее нескольких часов. В работах [Sazhin, Unuchkov., 2017; Отчет о научно-исследовательской..., 2018]

была проведена оценка возможности использования для коррекции модели ионосферы данных одновременных измерений ионосферных запаздываний от двух НС в течение часового периода и определяемой при этом разности этих величин. Показано, что это позволяет устранить влияние трудно учитываемой погрешности измерений, проводимых для одного НС, связанной с нестабильностью временной шкалы приемника, и определить разность ионосферных запаздываний сигнала от двух НС с ошибкой, составляющей в благоприятных условиях (близкое к точному определению координат спутников, спокойное состояние ионосферы), не более 5–6 нс (или в пересчете на измеряемую приемником «кажущуюся» дальность до НС, называемую псевдодальностью, менее 1.5–2 м). Случайные колебания указанной разности по данным одночастотного приемника имеют характерное время порядка 1–5 мин. Для их устранения необходимо использовать усреднение данных за период 30–60 мин. Это соответствует тому, что усредняется влияние локализованных неоднородностей ионосферы пространственных размеров в 150–200 км. Регулярный суточный ход такого усредненного значения разности достигает при низких углах места НС 15–20 м. Таким образом, в благоприятных условиях разности ионосферного запаздывания для двух НС, определяемые одночастотным приемником, будут характеризовать состояние ионосферы в данный час измерений и могут быть использованы для локальной коррекции модели ионосферы на текущую ситуацию, соответствующую часу, в который проводятся измерения. Выполнение коррекции модели ионосферы в режиме реального времени является важной особенностью данного подхода.

Основы методики уточнения значений критической частоты ионосферы для коррекции модели ионосферы на текущую ситуацию приведены в [Отчет о научно-исследовательской..., 2018], где для определения ионосферного запаздывания была реализована по известному методу характеристик программа расчетов траектории и задержки сигнала при распространении от НС к приемнику. Ионосфера задается аналитической однослойной составной моделью зависимости электронной концентрации от высоты. В программу также включен расчет «геометрической» дальности (без учета влияния ионосферы) между спутником и приемником, вертикального ПЭС для отдельной точки земной поверхности и наклонного ПЭС вдоль траектории распространения сигнала. Используемый подход позволяет устранить ошибку приближенного пересчета значения вертикального ПЭС в величину наклонного ПЭС, применяемого с использованием известной формулы для тонкого ионосферного слоя с неизменными параметрами в горизонтальном направлении. По оценкам, выполненным в работе [Суроткин, 2011], при наличии реальных горизонтальных градиентов электронной концентрации в ионосфере эта ошибка достигает 10 % и более для низких (менее 40°) углов возвышения спутников над горизонтом. Кроме того, в рамках данной программы учитывает-

ся, хотя и весьма малая, поправка третьего порядка на величину псевдодальности, связанная с рефракцией траектории в ионосфере (см., например, классификацию поправок в [Тинин, Конечкая, 2013]).

Для теоретической оценки относительных вариаций псевдодальности в зависимости от изменения параметров принятой модели ионосферы ранее [Сажин и др., 2014; Самолига и др., 2017] выполнены расчеты группового пути сигнала при различных значениях зенитных углов положения НС в ионосфере и определены значения ионосферной поправки  $\Delta P$ . Составной способ задания модели выбран, чтобы оценить относительное влияние на вариации псевдодальности изменения не только области главного максимума ионосферы, но и ее верхнего участка. Так, например, в [Сажин и др., 2014] показано, что вклад в ПЭС ионосферы участка высот от 500 км и до 2000 км может достигать до 30 %. При проведении расчетов были получены относительные изменения  $\Delta P$ , показавшие, что вариации критической частоты ионосферы оказывают наиболее существенное влияние на изменение  $\Delta P$ , значительно (в несколько раз) превосходящее влияние вариаций высоты максимума. Вариации критической частоты носят преобладающий характер в изменении  $\Delta P$  и по сравнению с вариациями параметра, изменяющего форму высотного профиля электронной концентрации на верхнем участке, однако, последние оказывают большее влияние, чем вариации высоты максимума.

При проведении уточнения значений критических частот ионосферы этот результат используется для подбора значений параметров составной модели ионосферы, дающих такое же значение ПЭС, что и глобальная модель ионосферы IRI [International ...], достаточно адекватно отражающая реальную форму высотного профиля электронной концентрации. Для этого в модели задаются взятые из IRI значения  $N_{\max}$  и высоты максимума, а затем при вычислении ПЭС по модели подбираются такие значения параметра  $Z_{0.1}$ , изменяющего форму профиля на верхнем участке, при котором обеспечивается лучшее совпадение значения ПЭС по модели со значением, получаемым для IRI.

Расчетная разность ионосферных запаздываний от двух НС вычисляется с использованием принятой аналитической модели ионосферы, откорректированной по данным модели IRI, и значений углов возвышения НС над горизонтом. Для этого из расчета траекторий сигналов от НС определяются точки пересечения траекториями линии максимума ионосферы — L1, L2. Далее находятся координаты проекций этих точек на земную поверхность. Затем значения критических частот модели изменяются для обеих точек L1, L2 и каждый раз вычисляются разности ионосферных поправок от двух НС. Из получаемого набора значений расчетной разности выбирается то, которое обеспечивает наилучшую близость к измеряемому значению. При этом соответствующие величины критических частот в модели ионосферы для данных точек и являются определяемыми значениями, которые используются затем в качестве уточненных текущих значений критической частоты ионосферы в этих точках.

Необходимость перебирать значения критических частот в модели одновременно для двух точек пространства вызывает определенные сложности в достижении однозначного алгоритма перебора. Однако, проведение расчетов расстояния между этими точками показало, что оно имеет небольшую величину в несколько сот км. В то же время, радиусы высокой пространственной корреляции отклонений значений критических частот от их среднемесячных величин имеют в спокойных ионосферных условиях, как показано в [Поляков и др., 1986], значительно большую величину, от тысячи км и более. Следовательно, изменение значений критических частот в данных двух точках можно проводить согласовано на одну и ту же относительную величину. При этом, изменение значения разности ионосферных запаздываний от двух НС, даже для одинакового изменения критической частоты в этих двух точках, происходит вследствие зависимости изменения ионосферной поправки от значения угла возвышения НС. Уточняемые таким образом значения критической частоты могут использоваться для локальной коррекции на текущую ситуацию глобальных среднемесячных моделей ионосферы, в частности, той же модели IRI. Развитие данной методики уточнения значений критических частот выполнено в работе [Konetskaya, 2018]. Предварительная апробация методики проведена [Отчет о научно-исследовательской..., 2018] в упрощенном варианте в режиме эпигноза. При этом, в качестве измеренных значений разности ионосферных запаздываний выбираются значения, полученные в результате расчета по величинам ПЭС из карт IONEX, построение которых проводится на основе обработки данных измерений ПЭС системой опорных двухчастотных приемников сигналов GPS. На рисунке показана конфигурация точек уточнения значений критической частоты для отдельных навигационных спутников, используемых для приема сигналов ГНСС одночастотным приемником с известными координатами местоположения в Иркутске, 19.11.20 в 11 ч LT. В табл. 1 приведены численные значения координат точек уточнения критической частоты. При этом, координаты самих спутников находились по уточненным эфемеридам.



Рис. 1. Конфигурация точек уточнения критической частоты для отдельных навигационных спутников в выбранный момент времени

Таблица 1

Данные по навигационным спутникам

Навигационные спутники	Координаты точек уточнения $f_oF_2$ , градусы		Углы возвышения и азимута, градусы		Пары навигационных спутников	Расстояния между точками уточнения значений критической частоты, км
	Северная широта	Восточная долгота	Угол возвышения	Угол азимута		
G1	50.9	106.0	59.7	82.1	G1-G11	163
G8	50.5	103.1	22.4	193.5	G1-G28	160
G11	51.8	106.4	42.2	66.7	G8-G17	506
G17	50.2	98.6	51.8	261.6	G8-G28	523
G28	52.5	102.6	83.9	217.3	G11-G28	291

Там же показаны расчетные значения углов возвышения и азимутов НС и расстояния между точками уточнения значений критических частот ионосферы для каждой пары спутников. Как видно, эти расстояния не превосходят 523 км. Момент времени выбран исходя из требования малости горизонтальных градиентов изменения критических частот между указанными точками.

В табл. 2 показан пример подбора параметров составной модели ионосферы для отдельных точек уточнения критических частот, координаты которых близки к координатам г. Иркутска. Данное обстоятельство позволяет взять для коррекции модели текущие значения критической частоты и высоты максимума по данным вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы для Иркутска из базы данных GIRO. В таблице приведены значения ПЭС по модели IRI с такой коррекцией и значения ПЭС, полученные для составной аналитической модели с теми же самыми значениями критической частоты и высоты максимума. Можно видеть довольно существенные отличия в значениях ПЭС, которые устраняются при подборе значения третьего параметра составной модели  $Z_{0.1}$ , изменяющего форму профиля на верхнем участке. В следующих колонках таблицы показаны используемые абсолютные отличия этого параметра от исходного значения и соответствующие относительные изменения. Далее приведены получаемые при этих изменениях значения ПЭС по аналитической модели.

Как видно, близость значений ПЭС по двум моделям достигается при изменении значения параметра  $Z_{0.1}$  относительно исходного значения примерно на -20 %.

При анализе всех ситуаций для пяти пар НС получено, что близость расчетных и «измеренных» значе-

Таблица 2

Пример подбора параметров составной модели ионосферы

Дата	ПЭС (IRI), TEC	ПЭС (ан.мод.), TEC	Получение ПЭС варьированием $Z_{0.1}$ , км	Отн. изменения $Z_{0.1}$ , %	Измененные значения ПЭС по ан.мод., TEC
19.11.2011	21.65	26.65	960	+20 %	31.9
			880	+10 %	29.3
			800	0	26.65
			720	-10 %	24.01
			640	-20 %	22.84

Таблица 3

Результаты уточнения критической частоты

Дата	Время, UTC	Пары HC	Точка для уточнения	$f_0F2$ ВЗ Иркутск, МГц	$f_0F2$ IRI, МГц	$ \Delta f_0 $ , МГц	$\frac{ \Delta f_0 }{f_0F2 \text{ ВЗ}}$ , %	ср. отн. ошибка, %
19.11.2011	03:00	G1-G11	G1	8.73	8.55	0.18	2.06	3.01
			G11		8.55	0.18	2.06	
		G1-G28	G1		8.55	0.18	2.06	
			G28		8.42	0.31	3.55	
		G8-G17	G17		8.28	0.45	5.15	
			G28		8.42	0.31	3.55	
		G11-G28	G11		8.55	0.18	2.06	
			G28		8.42	0.31	3.55	

ний разности ионосферных запаздываний достигается при изменении критической частоты в пределах не более 30 %. Такое изменение соответствует величине естественных вариаций этого параметра в спокойных условиях.

Для проверки эффективности уточнения текущих значений критической частоты нами взяты точки, координаты которых близки к Иркутску. В табл. 3 показаны значения уточненных критических частот в этих точках и значение критической частоты для Иркутска по данным ВЗ. Приведенные абсолютные и относительные отличия показывают, что достигнуто хорошее соответствие между уточненными и наблюдаемыми значениями.

Таким образом, проведенная упрощенная апробация методики свидетельствует, на наш взгляд, о возможности ее практической реализации в условиях спокойной регулярной ионосферы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Котова Д.С., Оводенко В.Б., Ясюкевич Ю.В. и др. Апробация метода коррекции модели ионосферы по данным приемников сигналов ГНСС в Сибирском регионе Труды международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых // Взаимодействие полей и излучения с веществом. Иркутск. 2017. С. 117–119.

Мальцева О.А., Родионова В.Т., Шлюпкин А.С. Использование полного электронного содержания для текущей диагностики состояния ионосферного канала // Геомагнетизм и аэронавигация. 2005. Т. 45, № 4. С. 480–486.

Мыльникова А.А., Ясюкевич Ю.В., Иванов В.Б. Получение абсолютного полного электронного содержания по одночастотным данным глобальных навигационных спутниковых систем. Труды международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых // Взаимодействие полей и излучения с веществом. Иркутск. 2017. С. 126–128.

Отчет о научно-исследовательской работе // Особенности распространения радиоволн в многомасштабной неоднородной ионосферной плазме. № гос. регистрации 01201256899. Иркутск, 2018.

Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. Semi-empirical model of the ionosphere for a wide range of geophysical conditions. 1986. 136 pp. (In Russian)

Сажин В.И., Унучков В.Е., Гольгин В.А. и др. Оценка пространственных вариаций ионосферного запаздывания сигнала по данным одночастотных приемников спутниковых радионавигационных систем // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 10. С. 91–100.

Сажин В.И., Ивельская М.К., Вдовин Е.М., Гольгин В.А. Развитие полумпирической модели ионосферы и методов ее адаптации к текущей ситуации // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». 2014. Т. 8. С. 102–118.

Самолига В.С., Сажин В.И., Тимофеев А.С. Моделирование вариаций псевдодальности в ГНСС. Труды международной Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике и конференции молодых ученых // Взаимодействие полей и излучения с веществом. Иркутск. 2017. С. 203–205.

Смирнов В.М., Смирнова Е.В., Секистов В.Н. и др. Распространение радиоволн коротковолнового диапазона и возможности метода радиопросвечивания ионосферы Земли для расчета максимально применимых частот // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 9. С. 1112–1120.

Суроткин В.А., Клименко В.В., Кореньков Ю.Н. Модельные расчеты полного электронного содержания для системы спутников GPS // Геомагнетизм и аэронавигация. 2011. Т. 51. С. 695–701.

Тинин М.В., Конецкая Е.В. Влияние геомагнитного поля на ионосферную ошибку спутниковых навигационных систем // Геомагнетизм и аэронавигация. 2013. Т. 53, № 6. С. 788–796.

Шебшаевич В.С., Дмитриев П.П., Иванцевич Н.В. и др. Сетевые спутниковые радионавигационные системы // Радио и связь. 1993. 408 с.

Afraimovich E.L., Yasukevich Yu.V. Using GPS-GLONASS-GALILEO data and IRI modeling for ionospheric calibration of radio telescopes and radio interferometers // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1949–1962.

Golygin V.A., Sazhin V.I., Unuchkov V.E. Adaptation of the ionospheric radio channel parameters to the current conditions using observations of the signals of reference radio stations // Geomag. Aeronomy. 2007. V. 47, N 1. P. 67–71.

Konetskaya E.V., Sazhin V.I., Timofeev A.S., Unuchkov V.E. Developing a method for local correction of monthly average ionospheric model for current situation: basing on data from single-frequency GNSS receivers. Proc. SPIE 10833, 24<sup>th</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmos. Phys. 108339L (13 December 2018). DOI: [10.1117/12.2504281](https://doi.org/10.1117/12.2504281).

Sazhin V.I., Unuchkov V.E. Possibility of correcting ionospheric model, using data from single-frequency receivers of global navigation satellite systems. Proc. SPIE 10466, 23<sup>rd</sup> International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmos. Phys. 104667C (30 November 2017). DOI: [10.1117/12.2284635](https://doi.org/10.1117/12.2284635).

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

URL: [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](https://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html).

URL: <http://giro.uml.edu/didbase/scaled.php>.