

**РЕГИСТРАЦИЯ ГРАДИЕНТОВ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ МЕТОДОМ
ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ С КА «ИОНОСФЕРА-М»**

И. В. Романов*, Д. В. Григорьев

Институт прикладной геофизики имени академика Е. К. Федорова, Москва, Россия

**E-mail: romanov@ipg.geospace.ru*

В работе обсуждаются эффекты влияния неоднородного распределения концентрации электронов в ионосфере на результаты транссионосферного радиозондирования (ТИЗ) при пролёте космических аппаратов «Ионосфера-М» над западной частью России. Ионограммы ТИЗ были получены в экспериментах с использованием наземных ионосферных станций Росгидромета (Электроугли, Калининград).

Метод ТИЗ основан на совместной работе наземной ионосферной станции и бортового ионозонда расположенного на космическом аппарате (КА) на околоземной орбите. При этом передатчик бортового ионозонда излучает зондирующие сигналы, а принимает приёмник наземного ионозонда (прямое ТИЗ), или наоборот (обратное ТИЗ). Таким образом возможно измерить значение наименьшей частоты прохождения сигнала сквозь ионосферу на трассе космический аппарат – Земля, которая может быть пересчитана в значение критической частоты f_0F в точке пересечения радиолучом максимума ионосферы. Горизонтальное распределение концентрации электронов можно рассчитать исходя из знания значений критических частот во время проведения нескольких сеансов ТИЗ за один пролёт.

Известно, что учёт значений горизонтальных градиентов (ГГ) электронной концентрации в ионосфере улучшает точность вычислений характеристик ионосферных радиотрасс. Метод ТИЗ позволяет определить ГГ между плоскостью орбиты космического аппарата и местом размещения наземной ионосферной станции. Совместная обработка результатов измерений критических частот области F на ионограммах ТИЗ, внешнего (ВнЗ) и вертикального зондирования (ВЗ) увеличивают геометрические размеры зоны проведения ионосферных измерений.

Эксперимент проводился в период с 20 по 21 декабря 2025 г. В процессе осуществлялось одновременное измерение ионограмм ВнЗ, ВЗ и ТИЗ. В экспериментах были получены серии ионограмм для различных положений и траекторий пролёта КА на орбите. Результаты регистрации показали, что на ионограммах различимы следы прямого и обратного транссионосферного зондирования, как для ст. Калининград так и для ст. Электроугли, которые позволяют определить критические частоты f_0F в зоне пересечения максимума ионосферы радиолучом. По полученным результатам построено пространственное распределение критической частоты f_0F на траектории движения спутника и определены горизонтальные градиенты плотности электронов.

Экспериментальные результаты подтвердили возможность получения дополнительной информации о распределении критических частот f_0F и значении концентрации электронов, и принципиальную возможность организации ионосферных измерений ГГ с помощью совместного использования космических аппаратов и наземных ионосферных станций. Полученные в эксперименте данные в период с 20 по 21 декабря 2025 г. показывают наличие существенного горизонтального градиента концентрации электронов, который наблюдается в вечерние и утренние часы, как вдоль широты так и долготы. В дневное время наблюдалось значительно меньшее значение градиента концентрации плотности электронов по сравнению с вечерними и утренними часами.

REGISTRATION ELECTRON DENSITY GRADIENTS USING TRANSIONOSPHERIC SOUNDING FROM THE IONOSFERA-M SATELLITES

I. V. Romanov*, D. V. Grigoriev

Fedorov Institute of Applied Geophysics, Moscow, Russia

*E-mail: romanov@ipg.geospace.ru

This paper discusses the effects of an inhomogeneous electron concentration distribution in the ionosphere on the results of transionospheric sounding (TIS). The study uses data from the passage of the Ionosfera-M satellites over the western part of Russia. The TIS ionograms were obtained during experiments using ground-based ionospheric stations of Roshydromet (Elektrougli and Kaliningrad).

The TIS method is based on the coordinated operation of a ground-based ionospheric station and an onboard ionosonde. The ionosonde is located on a spacecraft in near-Earth orbit. In this setup, the transmitter of the onboard ionosonde emits probing signals. The receiver of the ground-based ionosonde then receives them. This is called direct TIS. The reverse setup is also possible. This method allows scientists to measure the lowest frequency that can pass through the ionosphere on the spacecraft-to-Earth path. This frequency can then be recalculated into the critical frequency (f_0F) at the point where the radio beam crosses the maximum of the ionosphere. The horizontal distribution of electron concentration can be calculated based on the critical frequency values obtained from several TIS sessions during a single flyby.

It is known that accounting for the horizontal gradients of electron concentration improves the accuracy of calculations for ionospheric radio paths. The TIS method makes it possible to determine the horizontal gradient between the satellite's orbit plane and the location of the ground-based ionospheric station. By jointly processing the measurement results of the F-region critical frequencies from TIS ionograms, as well as from external and vertical sounding, the geometric size of the ionospheric measurement area increases.

The experiment was conducted from December 20 to 21, 2025. During this period, ionograms from external, vertical, and transionospheric sounding were measured simultaneously. The experiments produced a series of ionograms for different positions and flight paths of the spacecraft in orbit. The recorded results show that traces of both direct and reverse transionospheric sounding are distinguishable on the ionograms. This was true for both the Kaliningrad and Elektrougli stations. These traces allow scientists to determine the critical frequencies f_0F in the zone where the radio beam intersects the ionosphere's maximum. Based on the obtained results, a spatial distribution of the f_0F critical frequency was constructed along the satellite's trajectory, and the horizontal electron density gradients were determined.

The experimental results confirmed the possibility of obtaining additional information about the distribution of f_0F critical frequencies and electron concentration. They also confirmed the fundamental possibility of organizing ionospheric measurements of horizontal gradients through the combined use of satellites and ground-based ionospheric stations. Data obtained during the experiment from December 20 to 21, 2025, show the presence of a significant horizontal gradient of electron concentration. This gradient was observed in the evening and morning hours, both along latitude and longitude. During the daytime, the value of the electron density gradient was significantly smaller compared to the evening and morning hours