



## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ В АРКТИКЕ

Н. П. Данилкин, Г. А. Жбанков, А. Ю. Репин, М. Ю. Филиппов,  
Е. Н. Хотенко, И. В. Романов

Высокоширотная область является наименее изученной частью ионосферы. Ее исследование связано с объективными трудностями размещения ионозондов в условиях Арктики. В связи с этим разрабатываются новые методы диагностики полярной области. Одним из них может стать комплексный метод, основанный на совместной работе высокоширотных ИСЗ и сети наземных ионозондов. С его помощью можно проводить измерения  $foF2$  практически в любой области арктического региона на основе метода обратного транссионосферного радиозондирования. В статье также обосновываются техническая возможность и экономические преимущества предлагаемого метода.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ИОНОСФЕРА, КРИТИЧЕСКАЯ ЧАСТОТА, ИОНОЗОНДЫ, ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОМПЛЕКС «АРКТИКА-М»

### 1 ВВЕДЕНИЕ

Наблюдения состояния ионосферы вообще и определение её главного параметра – критической частоты ионосферы ( $foF2$ ) – могут производиться многими разными способами, но наиболее точным и физически наиболее обоснованным признается метод радиозондирования ионосферы ионозондами. Это признается всеми; и во всех промышленно развитых странах имеются собственные ионозонды или сети ионозондов. Современные ионозоды – это сложные радиотехнические устройства, которые для свойственных им прецизионных измерений используют также антенные поля, занимающие обширные территории и желателно располагающиеся в районах с минимальным уровнем помех [1]. Такие сложные требования для размещения ионозондов особенно трудно выполнить в условиях Арктики, где большая часть территории расположена в Северном Ледовитом Океане.

В настоящей работе предлагается новый способ измерения  $foF2$  практически в любой области арктического региона на основе метода обратного транссионосферного радиозондирования [2-8] с использованием существующих и в настоящее время работающих наземных ионозондов, а также специально разработанных и созданных приемников ионозодов, расположенных на ИСЗ, прежде всего, с высокоэллиптическими орбитами [3].

### 2 ПРИНЦИПАЛЬНАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Национальная космическая программа, к сожалению, не предусматривает создание высокоэллиптических ИСЗ на полярных орбитах (в отличие от американских) для целей дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) геофизического назначения. Поэтому следует использовать планируемые для исследования в Арктике отечественные высокоэллиптические аппараты "Арктика-М", которые имеют апогей и перигей такие же, как и американские полярные

спутники, однако, наклонение которых составляет только 63 градуса. Последнее означает, что на основе национальной программы использовать только внешнее радиозондирование для целей оперативной диагностики всей полярной арктической зоны нельзя. Однако, можно использовать трансионосферное радиозондирование, которое является составной частью системного радиозондирования. Несложный предварительный анализ показывает, что основное направление с учетом его стоимости и практической реализуемости следует выбрать на основе создания аппаратно-программных средств обратного трансионосферного зондирования с использованием мощных наземных передатчиков ионосферных обсерваторий системы Росгидромета и простых приемных устройств на КА с высокоэллиптическими орбитами.

На рисунке 1 показана принципиальная схема диагностики ионосферы в Арктике по методу трансионосферного радиозондирования на основе использования разрабатываемого в нашей стране гидрометеорологического комплекса "Арктика-М".

В этом проекте планируется выведение двух ИСЗ на солнечно-синхронные орбиты. Показаны направления движения ИСЗ и точки пересечения восходящих и нисходящих узлов. Комплекс имеет следующие характеристики [3]:

- параметры орбиты: высота апогея – 40000 км; высота перигея – 1000 км; наклонение – 63 градуса; период обращения – 12 часов.
- взаимное расположение орбит ИСЗ: с совпадением восходящего узла ИСЗ №1 и нисходящего узла ИСЗ №2.
- расположение рабочих участков орбит: начало и конец рабочего участка для каждого КА за 3,2 часа до прохождения апогея и через 3,2 часа после прохождения апогея; относительное смещение начала рабочих участков орбит ИСЗ №1 и ИСЗ №2 на 6 часов.

Установка ионозонда на ИСЗ с такими орбитами обеспечит непрерывное наблюдение высокоширотной ионосферы методом трансионосферного радиозондирования для регионов севернее 60 градусов северной широты (с.ш.). Для решения поставленных задач создается система наземных приемо-передающих пунктов. На рисунке 2 представлена проекция траекторий космических аппаратов №1 и №2 на поверхность Земли и места расположения наземных пунктов, в том числе, существующих наземных ионозондов в городах Москве, Новосибирске, Хабаровске, Тикси, Магадане, Петропавловске-Камчатском, Салехарде, Калининграде, Ростове-на-Дону, Подкаменной Тунгуске, Ловозеро, Баренцбурге и др.

Система действующих ионозондов «Парус-А» и "Томион" оснащена установками для приема информации при внешнем и трансионосферном зондировании.

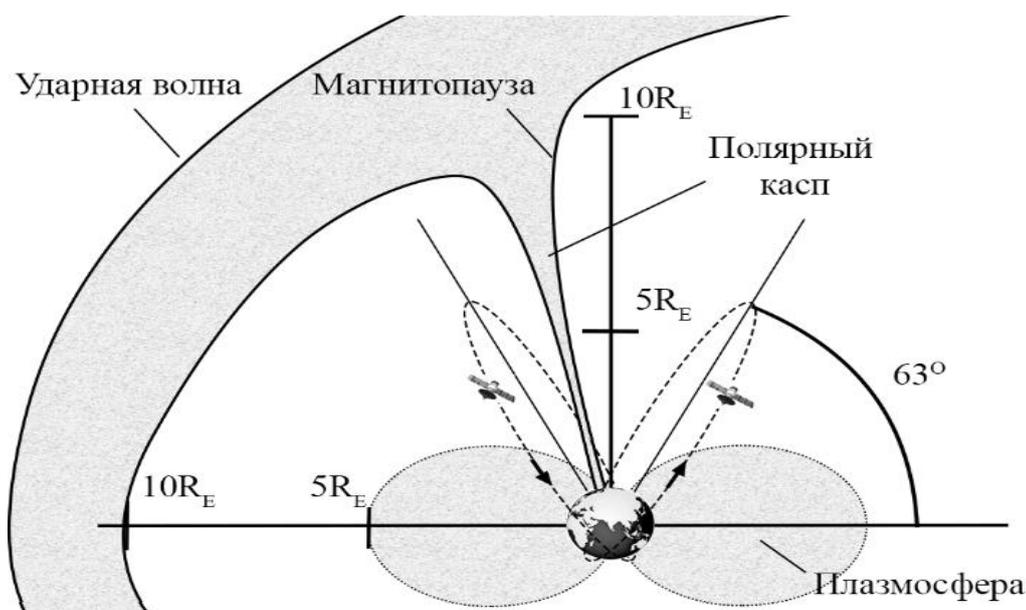


Рис. 1. Расположение двух КА «Арктика-М» с высокоэллиптическими орбитами на фоне основных структур околоземной плазмы.

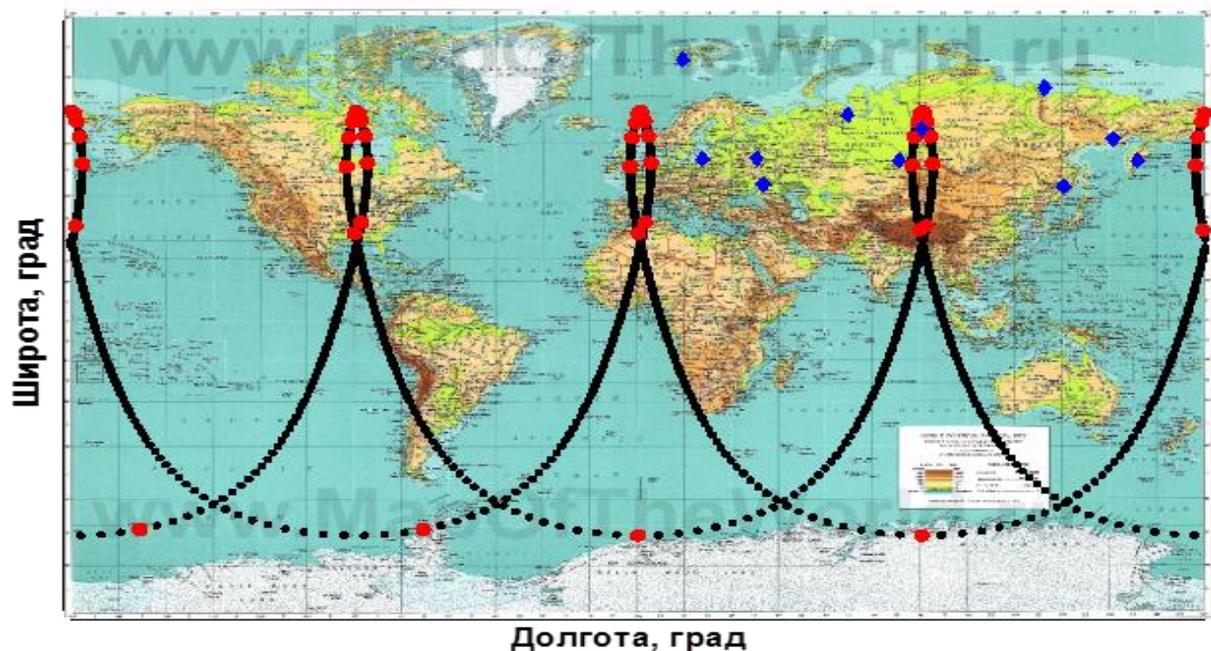


Рис. 2. Проекция траектории ИСЗ «Арктика-М» №1 и №2 на поверхность Земли. Красные и чёрные точки – часовые и 30-секундные интервалы при движении ИСЗ. Синие ромбы – система наземных приемных пунктов.

В ионосферных наблюдательных пунктах, в которых имеются наземные ионозонды, планируется осуществлять одновременно вертикальное наземное радиозондирование и регистрировать ионограммы внешнего и трансionoсферного зондирования с круговых космических аппаратов "Лазерт", а также обратного трансionoсферного зондирования с высокоорбитального космического комплекса «Арктика-М». Таким образом, будут одновременно регистрироваться три типа ионограмм: ионограммы наземного ионозонда, ионограммы внешнего зондирования и ионограммы трансionoсферного зондирования с ИСЗ на наземную станцию. Принято считать, что ионозонды наземного базирования производят высококачественную диагностику плазмы внутренней ионосферы над ионозондом ориентировочно в радиусе 150 – 200 км от него с ухудшением качества при удалении от центра. Бортовые ионозонды столь же качественно определяют высотную зависимость структурных параметров плазмы внешней ионосферы приблизительно с такими же радиусами строго под ИСЗ.

### 3 ТРАНСИОНОСФЕРНОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ – СПОСОБ ДИАГНОСТИКИ ПОЛЯРНОЙ ИОНОСФЕРЫ

Сравнительный анализ аппаратных методов получения ионограмм внешнего и трансionoсферного зондирования показывает, что для получения трансionoграмм на указанных выше рабочих участках (т.е. на высотах более 30 тысяч км) космических аппаратов, перспективным методом на сегодняшний день является как импульсный метод, так и подход на основе ЛЧМ-сигнала. Последний объединяет высокий коэффициент выигрыша за счет интегрального когерентного накопления и простоту структуры излучаемого сигнала (локально гармоническая радиоволна). Метод получения ионограмм внешнего зондирования на основе применения фазо-кодо-манипулированного сигнала на указанных рабочих участках требует накопления значительного числа импульсов, что усложняет последующую обработку сигналов для построения  $N_h$ -профилей ионосферы. Высокие глубины зондирования из областей апогея будут опираться при этом на большие области отражения сигналов, и вероятность получения рассеянных сигналов вместо отраженных сигналов увеличится. Учитывая, что спутники не пересекают 63 градуса с.ш., отметим, что для диагностики пространственных структур именно арктической части ионосферы особенно района полярной шапки можно использовать только метод обратного трансionoсферного радиозондирования на специально выделенных рабочих участках ИСЗ №1 и №2 (см. рис. 3) на основе записи сигналов наземных ионозондов.

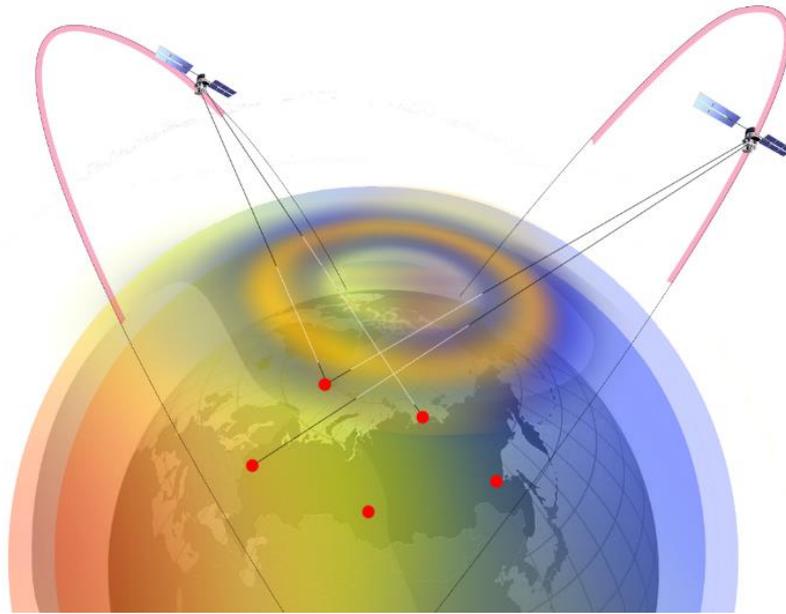


Рис. 3. Схема диагностики ионосферы в Арктике методом обратного трансфоносферного радиозондирования. Рабочие участки на траекториях обоих космических аппаратов выделены красным.

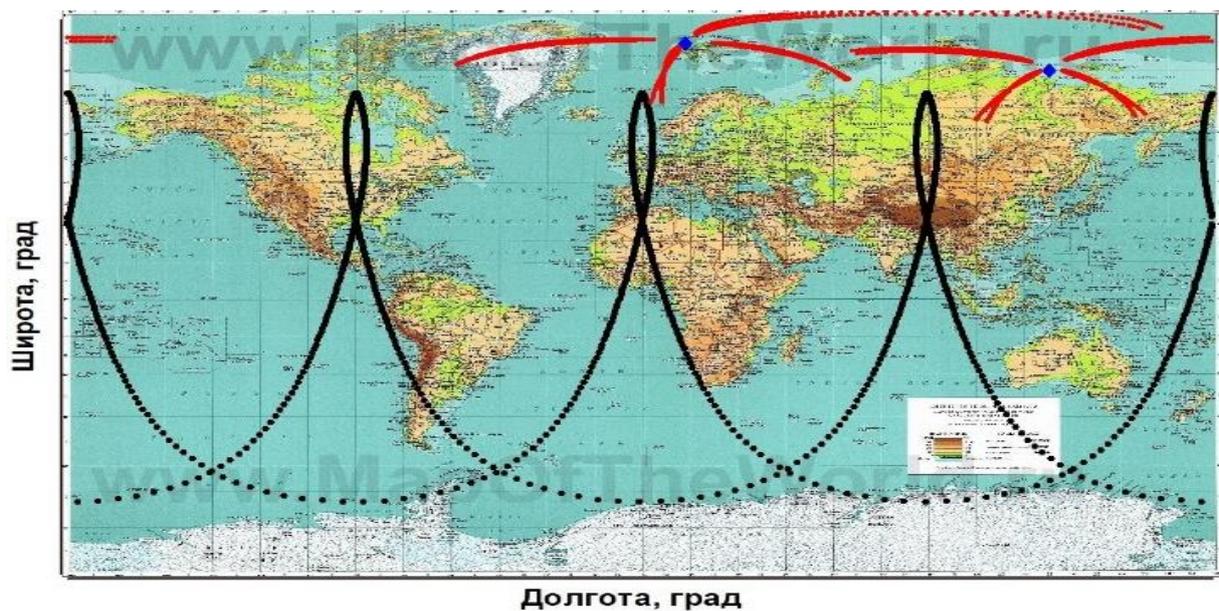


Рис. 4. Зоны оперативного контроля ионосферы в полярной шапке и в высокоширотной ионосфере РФ (красные линии) в схеме диагностики ионосферы методом обратного трансфоносферного радиозондирования с наиболее северных действующих ионосферных обсерваторий.

Рабочие участки видны из всех указанных выше пунктов наблюдения. Исследующие наклонные линии трансфоносферного зондирования проходят в этом случае сквозь любые районы арктической ионосферы – полярная шапка, авроральный овал и т.п. При этом основное современное требование к данному методу диагностики – проведение непрерывного наблюдения состояния ионосферы в интервалы времени порядка 6 часов соблюдается. В зависимости от того, какое именно пространство арктической ионосферы будет подвергаться изучению, можно выбирать также месторасположение других дополнительных наземных пунктов приема и регистрации ионосферной информации, варьируя места включения передатчика ионозонда на восходящих и нисходящих трассах ИСЗ.

Однако, при этом необходимо помнить, что мощность передатчика ионозонда ограничена, а габариты спутника не позволяют развернуть узконаправленную антенну. Для реализации внешнего зондирования в условиях высокоэллиптических орбит предлагается использовать корреляционный радиоприём с накоплением эхо-сигналов, либо использовать метод обратного транссионосферного зондирования.

Анализ существующих систем диагностики и контроля состояния ионосферы показывает, что для мониторинга высокоширотной ионосферы, особенно в районе полярной шапки, целесообразно производить мониторинг ионосферы методом транссионосферного радиозондирования на специально выделенных рабочих участках высокоэллиптической орбиты.

На рисунке 3 показана принципиальная схема диагностики ионосферы в Арктике по методу обратного транссионосферного радиозондирования на основе использования разрабатываемого в нашей стране гидрометеорологического комплекса "Арктика-М" и действующих наземных ионозондов системы Росгидромета.

Изученные ранее свойства транссионосферного радиозондирования, в том числе и обратного, примененные для указанного основного направления, показывают, что оперативные параметры ионосферы в наиболее сложном и наименее изученном районе Арктики успешно могут быть определены на основе рис. 4. На этом рисунке дополнительно к данным, указанным на рис. 2, показаны результаты расчетов для определения параметров ионосферы в Арктике на основе только двух наземных опорных пунктов, на которых работают наземные ионозонды в режиме системного радиозондирования: Баренцбург и Тикси. Черными точками – так же, как и на рис. 2 – показаны проекции обоих КА на поверхность Земли через одну минуту. Красными линиями обозначены последовательности точек пересечения транссионосферным лучом высоты максимума слоя F2 по наблюдениям в Баренцбурге и на Тикси (отмечены синими ромбами). Каждая вычисленная точка красной линии имеет четыре параметра: географическая широта, долгота, время и наименьшая частота электромагнитной волны, на которой происходит прохождение ионосферы насквозь. Последний параметр есть – как показали все эксперименты на ИСЗ «ИК-19», «Космос-1809» и космической станции «Мир» [9] – практически критическая частота ионосферы в этой точке после учета кривизны Земли.

#### 4 ОСОБЕННОСТИ НОВОГО МЕТОДА

Особенностью предлагаемого метода является его экономическая целесообразность и инженерная простота решения в одном из вариантов его применения. Наиболее экономичная и простая схема предполагает использование обратного транссионосферного радиозондирования, когда используется излучение с отечественных наземных мощных ионозондов (типа "Парус-А", "Авгур", "Томион"), а на высокоэллиптическом КА располагается только приемная часть ионозонда «Лазрт» и антенная система. При этом исключаются конфликты данного прибора, связанные с излучением различных частотных диапазонов на одном ИСЗ.

Принципиально неважно, какой именно метод применения зондирующих сигналов будет выбран – импульсный или непрерывного излучения (ЛЧМ). В обоих вариантах трассы распространения имеют длины в десятки тысяч километров, и они уже освоены в проведенных экспериментах по радиозондированию ионосферы.

В обоих случаях основная идея метода, которая заключается в том, что просвечивание насквозь происходит на длинной трассе (на восходящей и нисходящей ветвей её траектории), а для излучения используется рабочий участок траектории КА, который обеспечивает просвечивание насквозь именно той части арктической ионосферы, которая изучается в данный момент. Период обращения вокруг Земли каждого ИСЗ составляет 12 часов, из которых около 8 часов можно использовать для просвечивания арктических областей ионосферы.

При этом решается очень важная задача – увеличить время наблюдения процессов в максимуме ионосферы с тем, чтобы иметь возможность наблюдать весь процесс рождения, развития и диссипации ионосферных неоднородностей, что практически невозможно делать на круговых ИСЗ вследствие их быстрого пролета тех зон, которые находятся под наблюдением.

## 5 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя, отмечаем, для мониторинга ионосферы в арктической зоне РФ целесообразно использовать трансionoсферное радиозондирование, которое является составной частью системного радиозондирования. С учетом стоимости и практической реализуемости различных методов следует выбрать создание аппаратно-программных средств для обратного трансionoсферного зондирования с использованием мощных наземных передатчиков ионосферных обсерваторий системы Росгидромета и простых приемных устройств на КА с высокоэллиптическими орбитами.

Результаты получены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 3.9696.2017 / 8.9.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Данилкин Н.П. «Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами» // Труды ИПГ им. Академика Е.К. Фёдорова. 2014. Вып. 91 (Тематический выпуск), <http://ipg.geospace.ru/publications.html>
2. Данилкин Н.П. Трансионoсферное радиозондирование (обзор) // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57. № 5. С. 543-554.
3. Асташкин А.А., Комиссарова И.Н., Маркелова Т.С., Наговицина Н.В., и др. Информационное обеспечение исследования арктического региона с использованием гидрометеорологической системы «Арктика-М» // Космонавтика и ракетостроение. 2015. №6 (85). С.11–19.
4. Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Репин А.Ю., Филиппов М.Ю., Хотенко Е.Н., Шувалов В.А., Яковлев А.А. Некоторые особенности построения трансionoграмм, получаемых с борта высокоапогейных спутников // Космонавтика и ракетостроение. 2018. №3(102). С. 46-52.
5. Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлёв С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Репин А.Ю., Романов И.В., Филиппов М.Ю., Хотенко Е.Н., Шувалов В.А. Внешнее и трансionoсферное радиозондирование в Арктике при наличии нескольких бортовых ионозондов на разновысоких орбитах // Труды Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. 2018. №662. С. 73-77.
6. Данилкин Н.П., Журавлёв С.В., Лапшин В.Б., Романов И.В., Филиппов М.Ю., Шувалов В.А. Организация радиозондирования полярной ионосферы с борта высокоэллиптических космических аппаратов // Космонавтика и ракетостроение. 2017. №2(95). С. 135-145.
7. Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Лапшин В.Б., Филиппов М.Ю., Шувалов В.А. Определение критической частоты слоя ионосферы F2 над Арктикой по данным трансionoграмм, полученным с высокоапогейных спутников // Космонавтика и ракетостроение. 2017. №5(98). С. 140-149.
8. Данилкин Н.П., Журавлёв С.В., Котонаева Н.Г., Лапшин В.Б., Романов И.В., Филиппов М.Ю., Хотенко Е.Н., Жбанков Г.А. Радиозондирование высокоширотной ионосферы с гидрометеорологического комплекса "Арктика-М" // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2017. №3(37). С.103-109.
9. Котонаева Н.Г. Математическая модель радиозондирования ионосферы с искусственного спутника Земли на высотах ниже максимума концентрации электронов // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т.46. №2. С.234–242.

## METHOD FOR DETERMINING THE CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERE IN THE ARCTIC

Danilkin N. P., Zhbankov G. A., Repin A. Yu., Filippov M. Yu., Khotenko E. N., Romanov I. V.

The high latitude region is the least studied part of the ionosphere. Her study is associated with the objective difficulties of placing ionosondes in the Arctic. In this regard, new methods for the diagnosis of the polar region are being developed. One of them can be an integrated method based on the joint work of high-latitude satellites and a network of ground-based ionosondes. With its help, it is possible to measure foF2 practically in any region of the Arctic region on the basis of the method of reverse transionoсpheric radio sounding. The article also substantiates the technical feasibility and economic advantages of the proposed method.

**KEYWORDS:** IONOSPHERE, CRITICAL FREQUENCY, IONOSONDES, TRANSIONOSPHERIC RADIO SOUNDING, NUMERICAL MODELING, ARCTICA-M COMPLEX