

УДК 551.510.535; 550.338

МЕТОД МРПИ — ОСНОВА ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ИОНОСФЕРЫ ПОЛЯРНОЙ ЗОНЫ РФ В ОПЕРАТИВНОМ РЕЖИМЕ

Г.В. Гивишвили

Поступила в редакцию 11.01.2016 г.

Рассматривается альтернативный метод многочастотного радиопросвечивания ионосферы с использованием геостационарных или высокоэллиптических КА и наземных автономных приемных модулей. Показано, что метод позволяет строить 3D карты спокойной и возмущенной ионосферы в режиме реального времени (с обновлением в темпе $5 \div 10$ мин.) в диапазоне высот $80 \div 500$ км. Утверждается, что реализация метода практически позволит решить проблему оперативного контроля ионосферы в арктическом регионе РФ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, МЕТОД, РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЕ, КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, БОРТОВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ, НАЗЕМНЫЙ ПРИЕМНИК

1. ВВЕДЕНИЕ

Мониторинг ионосферы с помощью космических аппаратов (КА) основан на разновидности традиционного вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы, при которой ионозонд располагается на борту КА. Впервые эта идея была реализована в 1962 г. [1], после чего было произведено множество пусков КА с высотой орбиты от 508 до 3523 км с ионозондами на борту. Тем самым, было получена крайне ценная и богатая информация о глобальной структуре и широком спектре процессов, протекающих во внешней ионосфере. Это существенно дополнило и уточнило наши представления о процессах формирования и о динамике заряженных компонент в ОКП. Они, в свою очередь, явились экспериментальной базой для построения глобальных эмпирических моделей ионосферы, подобных серии IRI [2]. Доказавший свою жизнеспособность и востребованность, метод получил название внешнее зондирование (topside sounding), или ВнЗ. Однако, при всех его бесспорных преимуществах, ему также присущ ряд специфических особенностей, ограничивающих его применение в целях оперативной (в реальном времени) диагностики и краткосрочного прогноза состояния ОКП.

Во-первых, большая скорость перемещения проекции низкоорбитальных КА вдоль земной поверхности ($8 \div 12$ км/с) не позволяет строго разделять временные и пространственные характеристики диагностируемой среды.

Во-вторых, задержка между непосредственными измерениями параметров среды, сбросом данных в наземные пункты приема и первичной обработки информации с последующей выдачей результатов в аналитические центры составляет неопределенно долгое время. В частности, для полномасштабного анализа результатов измерений в проекте «Космос-1809», функционировавшем в конце 80-х годов, потребовалось около 20 лет. В-третьих, ВнЗ определяет, фактически, два параметра: критическую частоту (f_oF2) и высоту максимума слоя F2 в подспутниковой точке. Структура внутренней ионосферы остается недоступна контролю. В-четвертых, появление КА в зоне прямой видимости над каждым фиксированным пунктом наблюдений (или приема информации) происходит крайне ограниченное время ($20 \div 25$ мин), притом, вследствие смещения орбиты по долготе, не чаще одного раза в сутки.

Чтобы обойти эти препятствия, было предложено совмещать работу наземных и бортовых ионозондов при нахождении вторых в зоне прямой видимости с первыми [3]. Суть метода, названного прямым транзионосферным зондированием (ТИЗ), заключается в том, что во время прохождения бортового ионозонда над наземным, у последнего функционирует только приемник, с частотой, перестраиваемой синхронно с наземным ионозондом. Он регистрирует т.н. транзионограммы — групповые задержки сигналов, проходящих сквозь ионосферу. При обратном транзионосферном зондировании (ОТИЗ) излучателем сигналов является заведомо более мощный передатчик наземного ионозонда.

К сожалению, совмещение работы наземного и бортового ионозондов существенно усложняет условия проведения наблюдений, не давая никакого ощутимого выигрыша в информативности и, главное, оперативности данных измерений на практике. Это заключение подтверждается тем фактом, что к настоящему времени проведен лишь один успешный эксперимент по реконструкции $Ne(h)$ -профиля нижней части слоя F2 с их помощью [4]. Не исключено, что именно по этой причине методы ТИЗ и ОТИЗ не получили развития в мире.

В связи с вышеупомянутыми непреодолимыми трудностями использования методов ВЗ, ТИЗ и ОТИЗ в целях оперативного контроля состояния ионосферы над достаточно большими регионами (в частности, над Арктикой) далее рассматривается альтернативный подход, ориентированный на использовании сигналов радиопросвечивания в системе наземно-космической мониторинговой группировки. Отличие предлагаемого способа от метода ВЗ и его модификаций заключается в отказе от регистрации сигналов, испытавших полное внутреннее отражение от ионосферы. Его отличие от радиопросвечивания в УКВ диапазоне волн [5] состоит в использовании сигналов декаметрового диапазона, проходящих сквозь ионосферу вблизи границы радиопрозрачности. Далее рассматриваются особенности и достоинства метода, а также пути его реализации.

2. МЕТОДЫ ОПЕРАТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ИОНОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ВЫСОКООРБИТАЛЬНЫХ КА

Недостаток, связанный с большой скоростью перемещения проекции низкоорбитальных КА вдоль земной поверхности исключается полностью при использовании КА с геостационарной орбитой и частично для КА с высокоэллиптической орбитой. В том и другом случае ионосфера поддается контролю для участков земной поверхности, центрированных либо под долготой геостационарного КА, либо под зоной апогея орбиты высокоэллиптического КА. В этой связи представляет интерес рассмотреть возможность использования методов ВнЗ, ТИЗ и ОТИЗ, ориентированных на установку ионозондов на эти аппараты.

Для уверенного приема и отождествления отраженных от ионосферы сигналов ВЗ необходимо, чтобы отношение Φ (дБ) = $S/(N)$ сигнала (S) к шуму (N) по мощности на входе детектора приемника не опускалось ниже 15 дБ. Для частот КВ-диапазона ($3 \div 30$ МГц) и трассы, длиной порядка 36 000 км (геостационарный КА) выполнение этого требования связано с преодолением, фактически, неразрешимой технической проблемы [6]. Дополнительные трудности при установке ионозонда на КА с высокоэллиптической орбитой и зондировании методами ТИЗ и ОТИЗ связаны с тем, что, во-первых, высота КА над высокоширотной зоной Земли меняется от 10000 до 40 000 км. Следовательно, частота посылки импульсных сигналов и длительность сеанса зондирования должны меняться в очень широких пределах. Что создает сложности в функционировании приемопередающих систем и антенно-фидерных устройств (АФУ) бортового и наземного ионозондов. Во-вторых, прохождение КА над каким-либо наземным ионозондом будет происходить только два раза в сутки. Причем эти наземные станции ВЗ должны располагаться на строго определенных долготах, отстоящих друг от друга на 180° (как, например, Калининград и Паратунка), поскольку орбита КА не предусматривает долготного дрейфа. В-третьих, самым уязвимым местом всех спутниковых разновидностей метода ВЗ остается большой и неконтролируемый временной лаг между непосредственными измерениями и их анализом. Вследствие этого данные измерений ВнЗ, ТИЗ и ОТИЗ представляют несомненный интерес с академической точки зрения. Но с позиции их применения на практике в качестве средства оперативной диагностики и краткосрочного прогноза состояния полярной ионосферы их ценность вызывает большие и обоснованные сомнения.

3. МЕТОД МРПИ — АЛЬТЕРНАТИВНОЕ РЕШЕНИЕ

Вышеотмеченные препятствия к использованию космической техники в целях создания наземно-космической системы оперативного контроля за нормальными и возмущенными условиями состояния ОКП могут быть полностью или частично сняты при радикальном изменении идеологии его мониторинга. Новый подход включает в себя: а) ставку исключительно на просвечивание ионосферы на частотах декаметрового диапазона, близких к границе радиопрозрачности, что исключает резонансное взаимодействие (зондирование) между средой и радиоволной; б) отрыв радиопередающих от радиоприемных устройств. Тем самым: а) источником информации становится не традиционная ионограмма, а ионограмма, фиксирующая только сигналы радиопросвечивания; б)

инструментом измерения становится не ионозонд, а система из одного широкополосного бортового передающего модуля (БПМ) и сети из k наземных приемных модулей (НПМ) с частотой настройки, перестраиваемой синхронно с бортовым БПМ.

Выбор нижней и верхней границ частотного диапазона БПМ и НПМ определяется максимальными и минимальными значениями критической частоты слоя f_o — f_oF2 (МГц) и лежит в пределах $3 \div 30$ МГц. Их излучение и прием происходят сеансами в $5 \div 10$ мин. Так как в данном случае на земной поверхности регистрируются лишь сигналы, не испытавшие полного внутреннего отражения, метод назван многочастотным радиопросвечиванием ионосферы (МРПИ) [7–9].

Используя тот же КА в качестве ретранслятора в УКВ-диапазоне, можно обмениваться информацией, полученной в каждом данном сеансе измерений на каждом НПМ, со всеми остальными НПМ или центрами приема системы. Информация может ограничиваться первичными данными измерений, либо включать в себя скорректированные по ним локальные (модельные) $N_e(h)$ -профили внутренней ионосферы. Таким образом, каждый НПМ становится обладателем данных измерений, характеризующих «мгновенное» состояние ионосферы над всеми НПМ.

Указанное обстоятельство позволяет реконструировать 3D региональную или глобальную (при совмещении работы нескольких КА, установленных на геостационарных и высокоапогейных орбитах) структуру ионосферы, соответствующую текущему сеансу измерений, то есть, практически в реальном времени. Они легко преобразуются в 4D (пространственно-временные) карты распределения $N_e(h)$ -профиля над каждым НПМ автономно, оперативно ($3 \div 4$ мин) и независимо от специализированных центров сбора, обработки и выдачи информации потребителям. Это особенно актуально для полярной ионосферы, которую регулярно лихорадят эффекты аномального поглощения в полярной шапке (ППШ) и авроральной зоне (АП), аномального увеличения критической частоты спорадического слоя E_s (f_oE_s), положительные и отрицательные возмущения в слое F2 во время ионосферных и магнитосферных бурь и суббурь.

Благодаря высокой стабильности мощности излучаемых сигналов метод МРПИ представляет собой аналог искусственного риометра (измерителя уровня поглощения космического радиоизлучения). Мощность, излучаемая РПДМ, на несколько порядков величины превосходит мощность естественного космического излучения в КВ-диапазоне. В силу этого, сигналы, регистрируемые в методе МРПИ, несут больше информации и обладают существенно большей чувствительностью, нежели используемые в практике традиционных риометрических измерений.

Вследствие того, что высота орбиты геостационарных и высокоэллиптических КА (на рабочем участке) превышает 30000 км, появляется возможность оценивать полное электронное содержание (ПЭС) в диагностируемой широтно-долготной области ионосферы по затуханию трансionoсферных сигналов. Что особенно важно в условиях частых и сильных ионосферных возмущений, вносящих заметные погрешности в функционирование навигационных систем GPS и ГЛОНАСС в арктическом регионе.

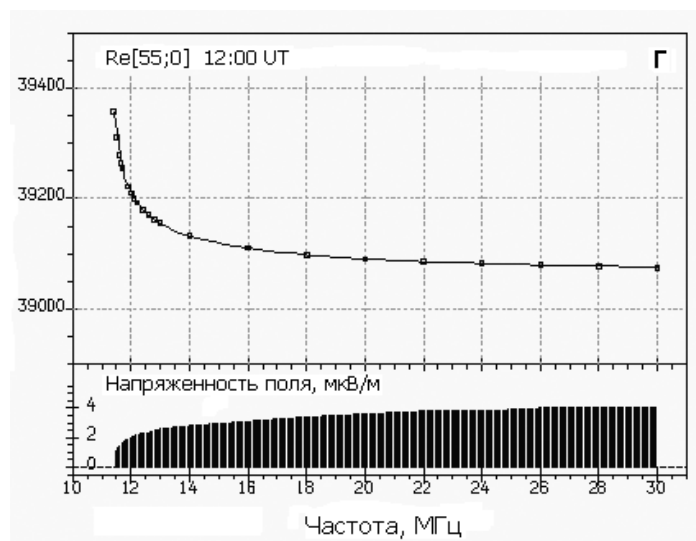


Рис. 1. Синтезированная ионограмма РПС с геостационарного КА для локального полудня сентября месяца и широты приема 55°

Таким образом, в каждом текущем сеансе измерений на каждом из k НПМ непосредственно определяются следующие характеристики:

1. f_c — частота отсечки, равная наинизшей частоте (НЧ) прошедших сквозь ионосферу сигналов, позволяющая оценивать значение $foF2$ и рассчитывать максимально применимую частоту радиосвязи (МПЧ);

2. $ymF2$ — полутолщина слоя F2, уточняющая расчет Ne(h)-профиля ионосферы от слоя E до высоты КА;

3. $L(f)$ — частотная зависимость поглощения трансionoсферных сигналов, позволяющая с высокой точностью оценивать энергетику КВ-сигналов, распространяющихся в полярной зоне, а также восстанавливать Ne(h)-профиль области D.

Они образуют не традиционные ионограммы вертикального (ВЗ), наклонного (НЗ) или внешнего (ВнЗ) зондирования, а ионограмму радиопросвечивания (РПС), которая представляет собой амплитудно-частотно-дистанционную характеристику (рис. 1).

3.1. Определение критической частоты $foF2$

Частота отсечки, соответствующая границе радиопрозрачности, зависит от местного угла возвышения β КА над данным НПМ, а также от состояния ионосферы, сезона, времени суток и горизонтальных градиентов электронной концентрации вблизи высоты максимума слоя F2. Так что:

$$f_c = \gamma foF2,$$

где γ — переменный коэффициент, зависящий от указанных условий.

Можно было бы предполагать, что с уменьшением угла β и при наличии больших горизонтальных градиентов плазмы значение будет возрастать γ от ~ 1 при $\beta \geq 60^\circ$ до 2–3 при $\beta = 10 \div 30^\circ$. Однако эксперименты на «Интеркосмос-19» показали (рис. 2), что даже при $\beta = 10 \div 30^\circ$ коэффициент γ находится в пределах $1 \div 2$ [4]. Следовательно, по последовательности регистрируемых сигналов просвечивания не трудно определить минимальную частоту просвечивания, а по ней мгновенную локальную частоту $foF2$ над каждым НПМ в данном сеансе просвечивания. По этим данным строится карта пространственного распределения $foF2$, соответствующая данному сеансу зондирования.

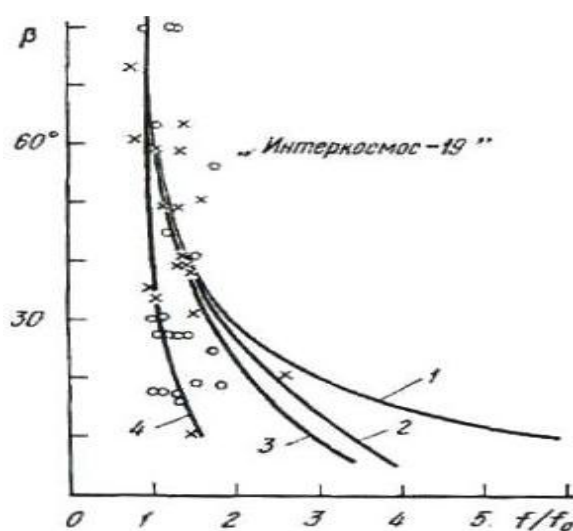


Рис. 2. Зависимость коэффициента $\gamma = f_i / foF2$ от угла возвышения КА над горизонтом:

1, 2 — экспериментальные данные;

3, 4 — результаты расчетов для полумпирической модели глобальной ионосферы

Разумеется, для надежного определения коэффициента γ , подверженного сезонным и суточным вариациям, а также зависящего от координат НПМ, требуется время, перекрывающее годовой цикл измерений.

3.2. Определение полутолщины слоя $ymF2$

В силу дисперсионных свойств ионосферной плазмы групповая скорость электромагнитных сигналов, распространяющихся в ней, падает с приближением частоты сигналов к плазменной частоте – $foF2$. Вблизи этой резонансной частоты время запаздывания сигналов, падающих на ионосферу вертикально или под некоторым углом β , достигает 300–1200 мкс независимо от того, происходит их полное внутреннее отражение или они проходят ионосферу насквозь. При параболической аппроксимации слоя F2 и вертикальном падении время задержки для трансionoсферных частот f_i определяется выражением [10]:

$$\Delta t_i = \frac{(ymF2) \cdot f_i \cdot (f_i + foF2)}{c(foF2)(f_i - foF2)}$$

где c — скорость света. В зависимости от значения $ymF2$ время задержки в ионосфере Δt составляет от 100 до 800 мкс. Измеряя Δt_i на ряде последовательных частот, можно восстановить $Ne(h)$ -профиль в диапазоне высот $\pm 100 \div 200$ км, отсчитывая от высоты максимума $hmF2$. Для повышения точности определения $ymF2$ по виду частотной кривой задержки $f\Delta(t_i)$ их желательно оценивать относительно синхронно излучаемых с ними УКВ пилот-сигналов. Время задержки последних в ионосфере составляет несколько десятком мкс.

3.3. Измерение поглощения радиоволн в нижней ионосфере

Фиксированное или медленно перемещающееся вблизи апогея положение КА позволяет измерять ионосферное поглощение Li трансionoсферных сигналов f_i по их амплитудно-частотной характеристике Ri . Величина поглощения при этом оценивается так же, как в известном риометрическом методе [11] по соотношению:

$$Li = 10 \lg (Ri)_n / (Ri)_d, \text{ дБ},$$

где нижние индексы « n » и « d » относятся к ночным и дневным условиям, соответственно. Метод не требует знания абсолютных параметров излучающего и приемного систем (включая антенно-фидерные устройства).

4. СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ИОНОГРАММ РПС

Расчеты лучевых траекторий для сигналов радиопросвечивания, проходящих путь от геостационарного КА до поверхности земли, выполнялись по комбинированному $Ne(h)$ -профилю. До высоты 2000 км значения $Ne(h)$ брались из модели IRI [2] и далее «сшивались» с моделью NeQuick [12] так, чтобы к 36000 км концентрация электронов сходилась к нулю. Пример такого двумерно-неоднородного сечения до высоты 1000 км показан на рис. 3 для 1200 LT 09.07.2010 г., а также приведены примеры лучевых траекторий для частот в близкой окрестности частоты отсечки (НЧ) синтезированных ионограмм РПС (наинизших частот, изучаемых с борта ИСЗ и принимаемых на земной поверхности в данной точке).

Расчеты выполнялись с учетом сферичности ионосферы для точек приема, расположенных вдоль меридиана до расстояния в 7000 км от экватора с шагом 500 км. Видно, что в силу сферичности Земли, с увеличением расстояния от экватора, они все более искривляются вблизи максимума слоя F2, отклоняясь от близкой к прямолинейной (квазиоптической) траектории на экваторе, почти не испытывающей рефракции. Это приводит к тому, что с увеличением расстояния от экватора значения НЧ все больше превышают локальные значения частоты $foF2$ в точках приема (рис. 4). А отношение $k = \text{НЧ} / foF2$ меняется от ~ 1 на низких широтах до 1,6–2,0 на широтах $\sim 50^\circ$ и более.

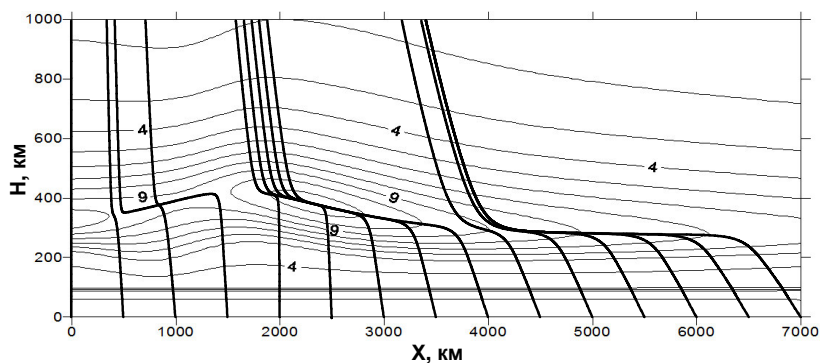


Рис. 3. Примеры двумерно-неоднородного сечения Ne(h)-профилей и лучевых траекторий НЧ

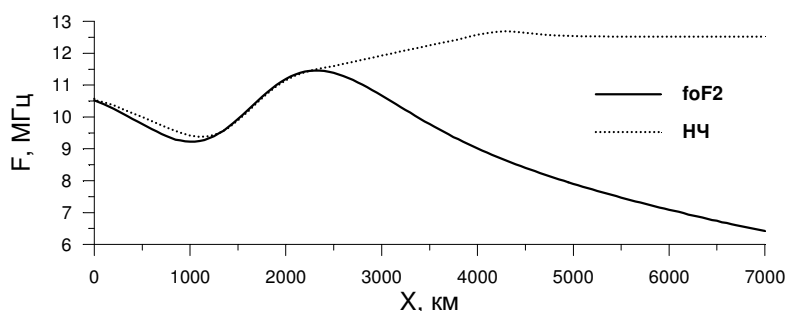


Рис. 4. Расхождение значений $foF2$ и НЧ с увеличением расстояния от экватора

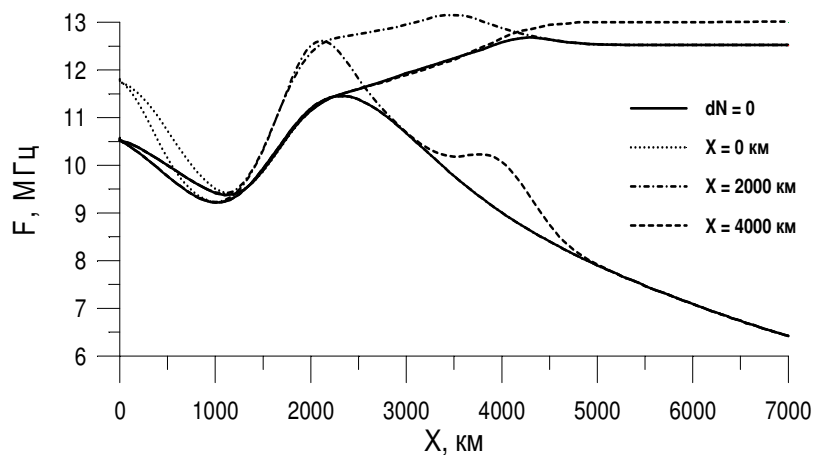


Рис. 5. Расчеты значений $foF2$ и НЧ при положительных возмущениях Ne

Иначе говоря, изображение ионосферы в параметрах НЧ деформируется – оно растягивается к высоким широтам. В этой связи представляло интерес проследить, как сказывается этот эффект при наличии крупномасштабных неоднородностей ионосферы. Для анализа их влияния на прохождение трансionoсферных сигналов распределение Ne вдоль долготы задавалось в виде $N = No(1 + \delta)$, где No – базовая, невозмущенная часть электронной концентрации, а дополнительное возмущение задается в виде:

$$\delta = dN \cdot \exp \left\{ - \left(\frac{x - x_0}{Lx} \right)^2 - \left(\frac{z - z_0}{Lz} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

Параметры $dN = + 25\%$, $Lx = 500$ км, $Lz = 100$ км оставались постоянными, z_0 выбиралось на уровне высоты максимума слоя, а x_0 являлось переменной величиной. Результаты расчетов НЧ и

значения критических частот для трех наборов параметров (x_0, z_0) : (0 км, 325 км); (2000 км, 400 км); (4000 км, 300 км) приведены на рис. 5.

Аналогичные данные для тех же значений Lx и Lz , но $dN = -25\%$, представлены на рис. 6.

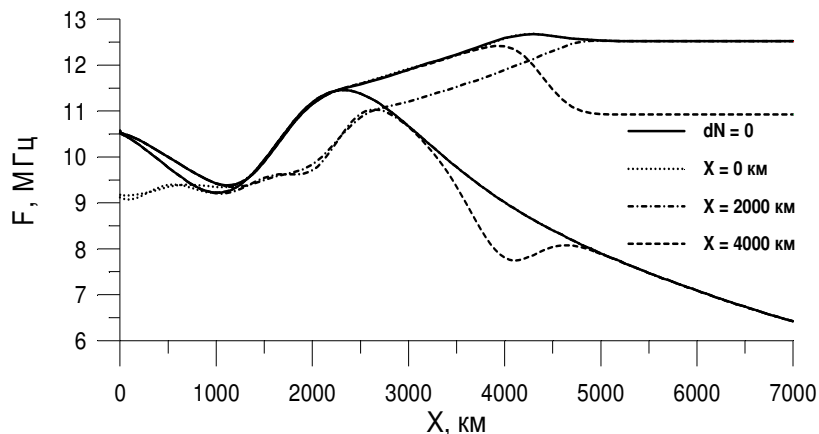


Рис. 6. Расчеты значений $foF2$ и НЧ при отрицательных возмущениях Ne

Нетрудно видеть, что как положительные, так и отрицательные возмущения НЧ при неоднородностях Ne указанных масштабов отчетливо проявляются на их невозмущенном фоне даже на средних широтах, где коэффициент k заметно превышает единицу. Вместе с тем, неоднородности масштабов, сравнимых с масштабами перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) слабо сказываются на пространственной структуре НЧ даже в низких широтах. В самом деле, представив ПИВ в виде гармонической волны вдоль всего сечения

$$N(r, \theta, t) = N_0(r, \theta, t) \left(1 + \delta(r) \cos \left[-\frac{2\pi}{T} t + -\frac{2\pi}{\lambda} R_0 \theta + \Phi_0 \right] \right) \quad (2)$$

с типичным возмущением $\delta = 10\%$, $\lambda = 250$ км и максимумом на высоте 300 км, контуры профилей fn и искомые траектории получим в виде рис. 7. При этом следует отметить, что широтный ход НЧ практически не отличается от такового из рис. 4. Заметное влияние ПИВ оказывает только на область, расположенную под спутником.

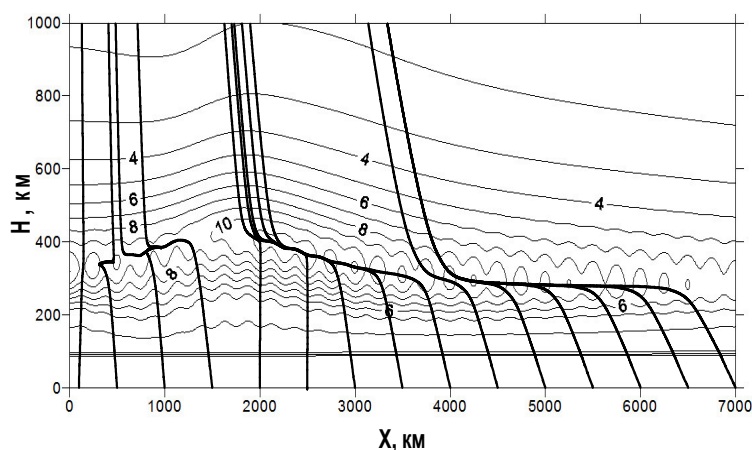


Рис. 7. Широтный ход лучевых траекторий НЧ для случая возмущений Ne(h)-профиля из рис. 3 перемещающимися ионосферными возмущениями с длиной волны 250 км и $\delta Ne = 10\%$

Таким образом, траекторные расчеты показывают, что метод многочастотного радиопросвечивания (МРП) позволяет отслеживать и уверенно регистрировать пространственно неоднородную структуру ионосферы, содержащую неоднородности с горизонтальными размерами от 500 км и выше, и возмущениями электронной концентрации от 25% и выше.

5. КАРТИРОВАНИЕ ДВУМЕРНОЙ (ШИРОТНО-ДОЛГОТНОЙ) СТРУКТУРЫ ИОНОСФЕРЫ

Анализ реакции пространственной структуры НЧ на наличие в ионосфере неоднородностей с положительными и отрицательными возмущениями N_e показывает, что метод уверенно регистрирует возмущения с отклонениями $\Delta N_e = \pm 25\%$, горизонтальными размерами $L_x = \pm 500$ км и вертикальными $L_z = \pm 100$ км. Проверку возможности восстановления пространственной панорамы НЧ при больших отрицательных возмущениях $foF2$ предоставили данные ионозонда Интеркосмос-19, который зарегистрировал возмущения $foF2$ над областью готовящегося разрушительного ($M=7,3$) землетрясения на острове Новая Гвинея. Оно имело место 16.07.1980 г. в точке с координатами $Lat = 3,2^\circ S$, $Long = 143,3^\circ E$ [13].

На рисунке 8 приведены зарегистрированные отклонения критических частот от невозмущенных условий согласно модели IRI за два дня (14.07), за день (15.07) и через сутки (17.07) после землетрясения. Так как максимальные возмущения $foF2$ были зарегистрированы 15.07, то рассматривались первичные данные внешнего вертикального зондирования именно за этот день для соответствующего региона (местное время 5.30 LT) — рис. 9а ($foF2$).

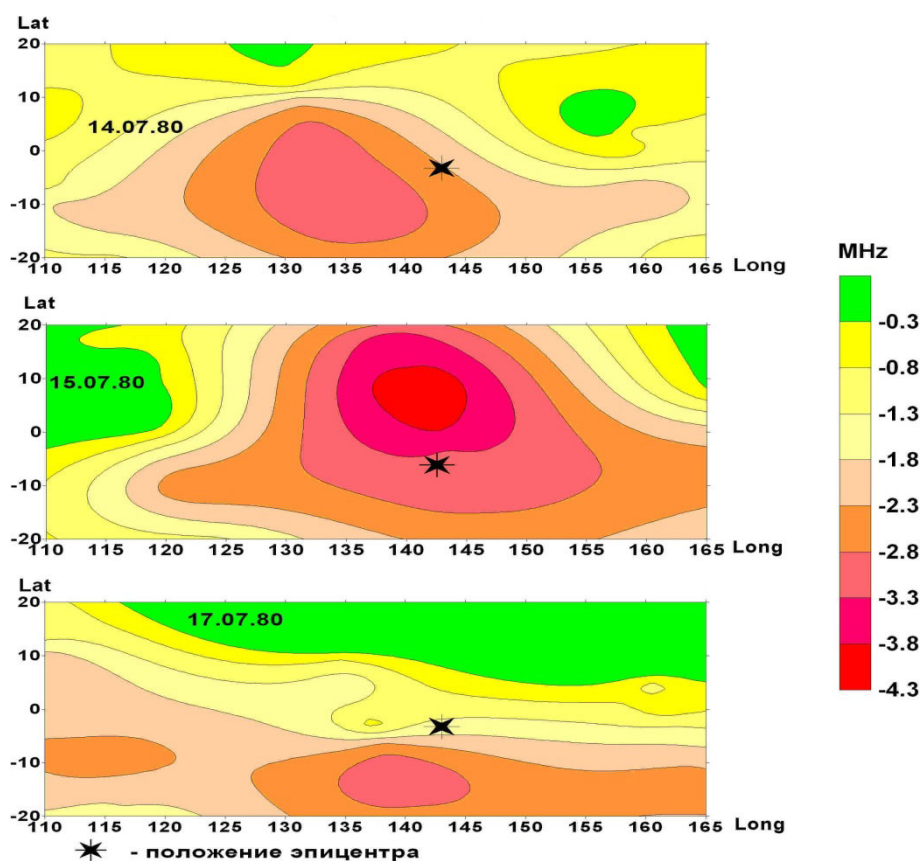
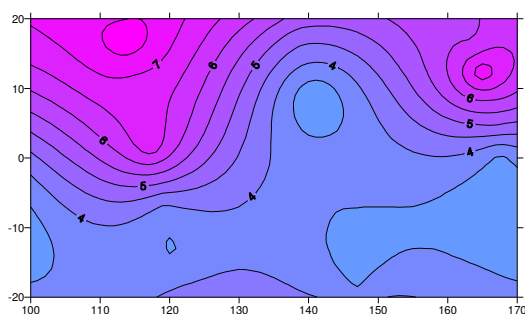
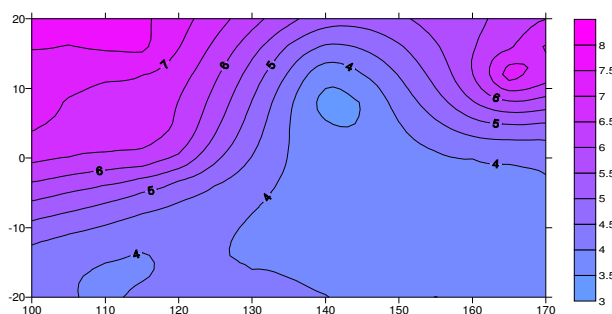


Рис. 8. Картирование значений $foF2$ над зоной землетрясения 16.07.1980 г. в Новой Гвинее

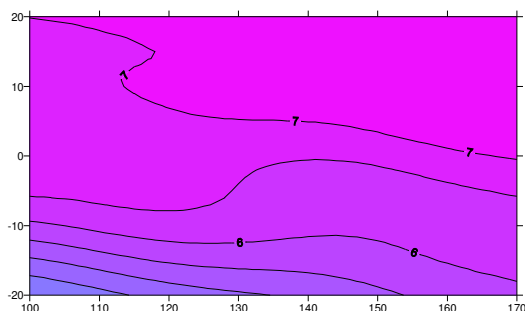
Затем рассчитывались значения НЧ, которые соответствовали бы данному пространственному распределению $foF2$ — рис. 9b (НЧ) при просвечивании с геостационарного спутника. (Расчеты проводились для излучателя, установленного на КА, расположенном на долготе 140° E). Далее рассчитывались значения $(foF2)_m$ и $(НЧ)_m$ для невозмущенных условий согласно модели IRI. Результаты расчетов представлены, соответственно, в виде $(foF2)_m$ и $(НЧ)_m$ на рисунках 9c и 9d. Видно, как и следовало ожидать, что модель очень далека от реального описания ионосферы в указанный день над данным регионом. Наконец, на рис. 9e ($foF2$) и 9f (НЧ) показаны контурные карты значений $\Delta foF2 = (foF2) - (foF2)_m$ и $\Delta НЧ = (НЧ) - (НЧ)_m$. Легко видеть, что пространственные структуры $\Delta foF2$ и $\Delta НЧ$ практически совпадают друг с другом. Это результаты свидетельствуют о том, что предлагаемый метод способен адекватно воспроизводить широтно-долготную структуру $foF2$ как в спокойных, так и в возмущенных условиях [14] при наличии достаточно плотной сети НПМ.

 $foF2$ НЧ


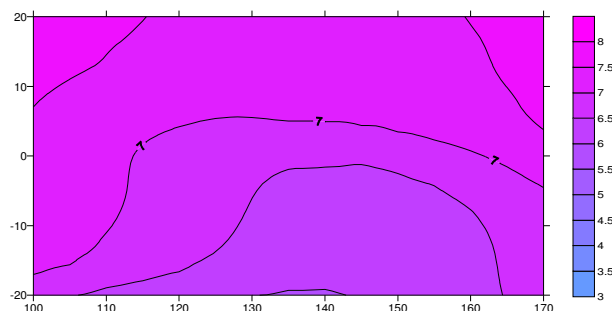
a

 $foF2$ НЧ


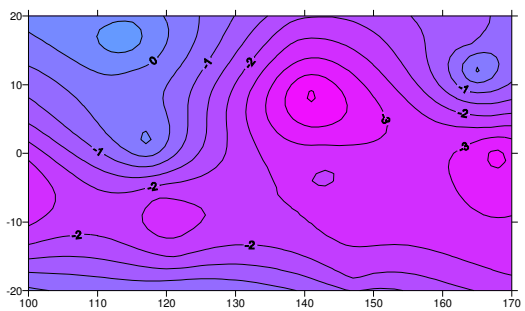
b



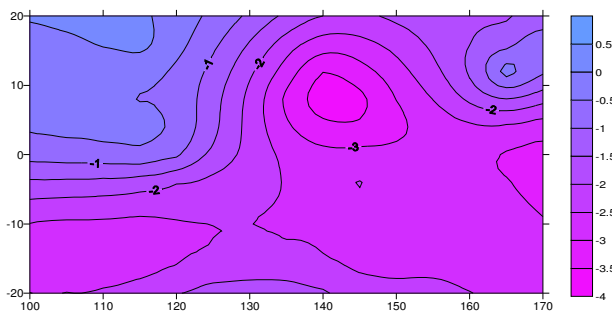
c



d



e



f

Рис. 9. Экспериментальные значения foE и расчетные значения НЧ

6. СПОСОБ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА МРПИ

Структурная схема системы, включающая БПМ и сеть из k НПМ, приведена на рис. 10 [15]. Способ определения 3D распределения электронной концентрации осуществляется следующим образом. Бортовой передающий модуль состоит из широкополосного (3–30 МГц) передатчика с антенно-фидерным устройством (АФУ), ориентированным на полярную область. Излучение КВ трансioносферных сигналов происходит сеансами в 5–10 мин по команде с земли.

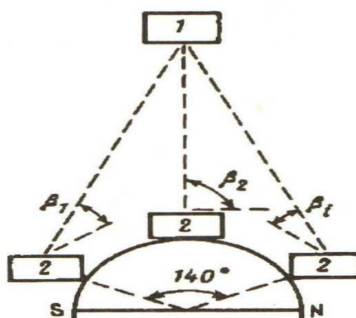


Рис. 10. Структурная схема наземно-космической системы «Арктика», содержащая один БПМ и сеть из НПМ

Медленное изменение положения высокоэллиптического КА над горизонтом не создает особых проблем для приема сигналов просвечивания, так как диаграмма направленности широкополосных АФУ КВ-диапазона составляет $\pm 60^\circ$ от вертикали. Это позволяет принимать сигналы, излучаемые БПМ, с большей части территории без заметного изменения угла наклона АФУ.

Приемный модуль также состоит из: а) приемного устройства и АФУ КВ-диапазона, б) вычислительного комплекса, оперативно обрабатывающего первичную информацию. При этом рассчитывается локальный $Ne(h)$ -профиль во всем столбе ионосферы в текущем сеансе измерений и пересылается в систему передачи информации другим НПМ. При наличии множества $Ne(h)$ -профилей ионосферы, воспроизводимых в отдельных НПМ, они «сшиваются» в каждом данном сеансе измерений, образуя 3D структуру Ne над регионом расположения сети НПМ. Результаты обработки данных последовательной серии измерений позволяют отслеживать динамику изменчивости реконструируемой объемной карты Ne и, тем самым, региональную 4D структуру ионосферы в диапазоне высот 80–500 км.

Все процедуры извлечения, обработки и обмена данными измерений совершаются автоматически, без какого-либо патронажа специалиста. Так как энергопотребление приемных модулей мало, современные приемные антенны КВ-диапазона достаточно компактны, нет никаких ограничений на то, чтобы устанавливать их на любых стационарных объектах, включая геофизические и метеорологические обсерватории, а также на многих подвижных платформах, включая дрейфующие полярные станции, ледоколы, буи и т.д.

7. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МЕТОДА

Энергетическая проблема главная для создания устойчивой связи на трассе высокоапогейный КА–Земля. В методе МРПИ она решается следующим образом. Так как положение высокоапогейного КА медленно меняется над горизонтом, многократное удлинение трассы в сравнении с ВнЗ компенсируется возможностью: а) существенного сужения полосы приемного устройства (до единиц и сотен Гц), б) накопления сигналов — работы в режиме, определяемом динамикой ионосферы, т.е. до 5÷10 мин.

Рассмотрим чувствительность параметра $\Phi = S/N$ к различным факторам и шумовым характеристикам среды распространения сигнала в зависимости от параметров передающего и приемного устройств для условий умеренной ($W = 100$) с $foF2 = 8$ МГц и высокой солнечной активности ($W = 200$) с $f_2 = 12$ МГц. Расчеты ведутся для частот близких к границе радиопрозрачности, т.е. для $f_1 = 8,5$ МГц и $f_2 = 12,5$ МГц. При расчете потенциала радиотрассы из рассмотрения исключались промышленные шумы и помехи от мощных вещательных

радиопередатчиков, поскольку полярная зона достаточно далеко удалена от густонаселенных регионов. В простейшем варианте исполнения приемо-передающего комплекса рассматривается использование:

1. импульсных сигналов с импульсной мощностью излучения $P_{\text{пер}} = 1000$ Вт;
2. передающей антенны типа волновой диполь ($G_{\text{пер}} = 2$ дБ);
3. широкополосной приемной антенны в пункте приема с коэффициентом усиления $G_{\text{пр}} = 10$ дБ в диапазоне $3 \div 30$ МГц;

В расчетах использованы карты максимального уровня атмосферных помех и космических помех [16]. Для расчета отношения Φ использовалась формула односторонней связи [17]:

$$\Phi = 32 + 10 \lg(P_{\text{пер}}) + G_{\text{пер}} + G_{\text{пр}} + 20 \lg(l) - L_x - 20 \lg(D) - 10 \lg(B) - F \quad (3)$$

где l — длина волны.

Суммарные потери радиолинии без учета потерь на распространение в свободном пространстве:

$$L_x = L_u + L_{FT} + L_{FR} + L_P \quad (4)$$

где L_u — потери в ионосфере, L_{FT} , L_{FR} — в АФУ передатчика и приемника, L_{FR} — поляризационные потери.

Полоса частот приемного тракта

$$B = 2 / \tau \quad (5)$$

Суммарные шумовые потери

$$F = 10 \lg \{(T_{\text{пр}} + T_{\text{атм}} + T_{\text{косм}}) / 290\} \quad (6)$$

где $T_{\text{пр}}$ — температура приемника,

$T_{\text{атм}}$ — температура атмосферы,

$T_{\text{косм}}$ — температура космического излучения.

Потери при распространении в свободном пространстве

$$D = \text{длина трассы} \quad (7)$$

Минимальное значение Φ должно быть 15 дБ.

Расчеты по формуле (3) представлены в таблице.

Таблица

Частота, МГц	W = 100		W = 200	
	b = 90°	b = 65°	b = 90°	b = 65°
8,5	20.1	19.4	—	—
12,5	—	—	26.0	24.1

Они показывают, что при учете всех вышеуказанных факторов можно ожидать уверенного приема сигналов декаметрового диапазона, излучаемых с высокоапогейного КА не только для умеренной, но и высокой солнечной активности. Принятая в расчетах мощность излучения, равная 1 кВт не должна настораживать. Так как средняя излучаемая мощность при скважности, превышающей 1000, составляет только 0,2 Вт. Тем не менее, излучение импульсных сигналов относительно большой мощности может создавать проблемы электромагнитной совместимости с другой измерительной аппаратурой, находящейся на борту КА. Альтернативный способ решения проблемы энергетика трассы с использованием метода линейно-частотной модуляции рассмотрен в [18].

8. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТЬ РЕАЛИЗАЦИИ ПРЕДЛАГАЕМОГО МЕТОДА

Экспериментальные свидетельства возможности реализации устойчивой радиотрассы в КВ-диапазоне волн между геостационарной орбитой и земной поверхностью основаны на данных измерений, ведущихся с 50-х годов прошлого столетия. Они могут быть разделены на 5 групп:

1. Измерения интенсивности радиоизлучения Солнца в интервале зенитных углов $\chi = 0 \div 80^\circ$ на частотах ≥ 5 МГц, с рефракционной поправкой по углу, не выходящей за пределы $1'$ [19].
2. Измерения интенсивности радиоизлучения Юпитера на частотах $8 \div 40$ МГц; с шириной лепестка приемной антенны, составляющей около $2,5^\circ$ [20].
3. Измерения интенсивности космических радишумов на частотах $9 \div 25$ МГц в годы высокой, умеренной и низкой солнечной активности (рис. 11) [21].
4. Измерения интенсивности дискретных источников космического радиоизлучения: $5,8 \div 25$ МГц (Кассиопея А) и $13 \div 25$ МГц (Лебедь А) [22].
5. Радиомаяковые измерения с геостационарных КА на частотах $40 \div 41$ МГц [23, 24].

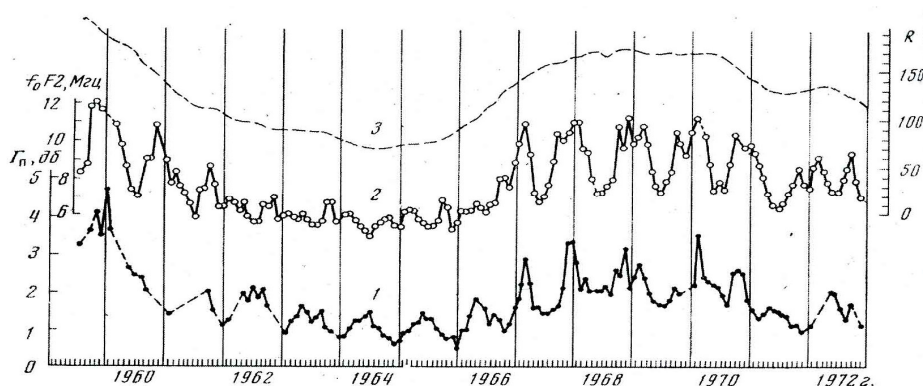


Рис. 11. Межгодовые вариации: поглощения космических радишумов на частоте 13 МГц — кривая 1; $foF2$ — кривая 2; сглаженных чисел Вольфа — кривая 3.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрен новый (альтернативный) метод диагностики околоземного космического пространства, основанный на методе радиопросвечивания (РПС) ионосферы сигналами переменной частоты декаметрового диапазона. Сигналы излучаются с борта геостационарного или высокоапогейного КА и принимаются на земной поверхности сетью из множества автономных приемных модулей. Результаты их анализа фиксируются в виде ионограмм РПС в противоположность известным ионограммам ВЗ, НЗ или ВнЗ. Излучение, прием и регистрация ионограмм РПС, их обработка и анализ, а также построение высотных профилей электронной концентрации происходят сеансами по $5 \div 10$ мин. Все операции производятся автоматически, без участия человека в режиме реального времени. Приемные модули независимы друг от друга, тем не менее, благодаря автономной системе УКВ-связи они могут обмениваться текущей информацией о состоянии ионосферы над всем занимаемым ими регионом. В результате появляется возможность оперативно строить временную развертку 3D карт спокойной и возмущенной ионосферы в диапазоне высот $80 \div 500$ км, где ионосферная плазма заметно влияет на распространение радиоволн. Тем самым, появляется возможность создания основы для практического решения проблемы мониторинга ионосферы в режиме 4D в арктической зоне Российской Федерации.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-29-06052.

ЛИТЕРАТУРА

1. Florida C.D. The Development of a series of ionosphere satellites // Proc. IEEE/ V. 57, № 6, P.867-875, 1969.
2. Bilitsa D. International Reference Ionosphere.//Adv.Space.Res. V.20, №10, P.1751-1769, 1997.
3. Данилкин Н.П. О получении и возможном использовании транзиограмм.// Геомагнетизм и аэрономия. Т.14, №2, С.369- 371, 1974.
4. Авдюшин С.И., Данилкин Н.П., Иванов И.И. и др. Транзионосферное зондирование на границе радиопрозрачности ионосферы. //Геомагнетизм и аэрономия, Т. 23, № 4, С. 567-572. 1983.
5. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Томография ионосферы. М. Наука. 176, 1991.
6. Крашенинников И. В. Анализ типов зондирующих сигналов в задаче ионосферного радиозондирования и критерии эффективности использования космических систем для проведения транзионосферного мониторинга в Арктике // (Данный выпуск).
7. Гивишвили Г. В., Иванов-Холодный Г.С. Авторское свидетельство № 1443619 от 08. 08. 1988.
8. Гивишвили Г.В. Многочастотное просвечивание ионосферы – новый метод глобальной диагностики ионосферы в реальном времени. // Космические исследования. Т. 32. Вы.4-5. С. 142-149. 1994.
9. Г.В.Гивишвили, В.В.Мигулин. Метод многочастотного радиопросвечивания ионосферы как средство индикации литосферно-ионосферных возмущений в реальном времени. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 39. № 5. С. 95-98. 1999.
10. Гинзбург В.Л.Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
11. Митра А.П. Воздействие солнечных вспышек на ионосферу Земли. М. 370 С. 1977.
12. Nava B., Coisson P. and Radicella S.M. A new version of the NeQuick ionosphere electron density model // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, V.70, Issue 15, P.1856-1862, 2008.
13. S.A. Pulinets. Strong earthquake prediction possibility with the help of topside sounding from satellites. //Advance in Space Research. V.21. № 3.P. 455-458. 1998.
14. Гивишвили Г.В., Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Крашенинников И.В. Дистанционное зондирование ионосферы в декаметровом диапазоне с геостационарного ИСЗ.// Геомагнетизм и аэрономия. М.: Наука. Т. 52. № 4. С. 519-524. 2012.
15. Гивишвили Г. В., Иванов-Холодный Г.С. Способ определения пространственно-временного распределения критических частот слоя F2 ионосферы //Б.И. № 23, 1991.
16. ГОСТ Р 25645. 163-96. Характеристики радишумов в околоземном пространстве в диапазоне частот от 0,1 до 50 МГц.
17. Пенин П.И. Система передачи цифровой информации. М. Советское радио. 1976.
18. Гивишвили Г.В., Крашенинников И.В. Многочастотный мониторинг ионосферы с помощью геостационарного ИСЗ. Распространение радиоволн XXII. Ростов-на-Дону, Т. 1, с. 88 - 92. 2008.
19. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М. С. 59, 1964.
20. Железняков В.В. Радиоизлучение Солнца и планет. М. С. 213, 1964.
21. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В. Поглощение радиоволн в ионосфере умеренных широт в течение цикла солнечной активности. // Геомагнетизм и аэрономия. Т. 25, №2, С. 251-254. 1975.
22. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Коробков Ю.С. О спектре дискретных источников космического радиоизлучения Кассиопея А и Лебедь А в декаметровом диапазоне волн // Астрономический журнал, Т. 44, №5, С. 981-983, 1967.
24. Ерухимов Л. М., Митякова Э.А., Мясников Е.Н. и др. О спектре искусственных ионосферных неоднородностей на разных высотах. // Изв. ВУЗов Радиофизика. Т. 20, №12, с. 1814-1820, 1977.
25. Солодовников Г.К., Синельников В.М., Крохмальников Е.Б. Дистанционное зондирование Земли с использованием радиомаяковых космических аппаратов. М. Наука. 1988 г.

MFRT METHOD - THE BASIS FOR REMOTE MONITORING THE IONOSPHERE OF THE RF POLAR ZONE IN OPERATIVE MODE

G. V. Givishvili

Alternative method of multi-frequency radio translucence of ionosphere with the use of geostationary or high-elliptic satellites and the ground-based autonomous receiving modules is considered. It is shown that the method has a potential to provide 3D current time cards of the ionosphere (with updating at rate of 5 – 10 min) in the height range of 80 – 500 km. Realization of the method, as supposed, may considerably improve the quality of operating control of the ionosphere in the Arctic region of RF.

KEYWORDS: IONOSPHERE, METHOD, RADIO TRANSLUCENCE, SATELLITE, BOARD TRANSMITTER, SURFACE RECEIVER