

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 50.388.2

## ТЕХНОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИГНАЛОВ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В МНОГОСЛОЙНОЙ ИОНОСФЕРЕ

Волков Д.М., Злуницын О.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б.,  
Тихонов В.В., Шишковская К.Г.  
ЗАО «РТИС ВКО», г. Тверь

---

*Поступила в редакцию 26.05.2016, после переработки 03.06.2016.*

---

В работе исследуются возможности применения сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) для решения задач диагностики условий распространения радиоволн декаметрового диапазона. Рассмотрены преимущества и недостатки данного типа сигналов при использовании их в качестве средств диагностики. На основе анализа работ по использованию данных сигналов в качестве средств информации об ионосфере предложена общая методика моделирования сигналов ВНЗ на трассах различной ориентации и протяженности.

**Ключевые слова:** ионосфера, средства диагностики характеристик ионосферы, модели ионосферы, декаметровый диапазон волн, спутниковые радиотехнические навигационные системы (СРНС), навигационная система ГЛОНАСС, система дифференциальной коррекции и мониторинга (СДКМ), условия распространения радиоволн.

*Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 2. С. 123–143.*

### Введение

Распространение декаметровых радиоволн (или КВ) напрямую зависит от состояния ионосферы. Наиболее существенной областью, влияющей на условия распространения декаметровых радиоволн (РРВ), является область входа радиолуча в ионосферу. Данную область ионосферы необходимо постоянно диагностировать, чтобы была возможность прогнозировать условия распространения радиоволн на заданной радиотрассе. Контроль параметров ионосферы в настоящее время осуществляется следующими средствами: ионозондами (маломощный радиолокатор вертикального зондирования) различных типов, ионозондами наклонного зондирования (НЗ), ионозондами (радиолокаторами) возвратно-наклонного зондирования, специальными геофизическими ракетами. Кроме зондирования ионосферы с земли в последние 20-25 лет применяется зондирование ионосферы сверху: ионозондами, размещенным на специальных космических аппаратах или ИСЗ, путем

использования излучений навигационных ИСЗ типа GPS, ГЛОНАСС или навигационных ИСЗ, размещенных на стационарной орбите – спутниковых радиотехнических навигационных систем (СРНС) [1–3].

Анализ ряда последних работ [1, 4–7] показал, что сигналы ВНЗ, с точки зрения определения по ним параметров ионосферы, не являются достаточно информативными. Решить по ним обратную задачу (ОЗ), то есть определить по радиофизическим параметрам сигналов ВНЗ характеристики ионосферы, можно лишь в отдельных случаях. В то же время, определить оптимальные рабочие частоты (ОРЧ) для связных радиолиний КВ или загоризонтных радаров по данным сигналам возможно [4, 5, 7], а иногда этот метод оказывается единственно возможным (при морской радиотрассе, в горной местности). Данные сигналы являются источниками информации, по которым можно определить наличие энергии с требуемой дальности, например, в радиолокаторах загоризонтного обнаружения. Для использования сигналов ВНЗ в качестве индикаторов, подтверждающих наличие электромагнитного поля волны на требуемой дальности, необходимо знать особенности формирования сигналов ВНЗ и траекторию их прихода в антенну приемного устройства.

При решении задач загоризонтной локации к сигналам ВНЗ необходимо выбрать сигнал с минимальным количеством мод, оценить затухание сигнала на заданной трассе локации [7].

Таким образом, необходимость моделирования сигналов ВНЗ является весьма актуальной и прагматической задачей. В статье предлагаются подходы к решению данной задачи.

## 1. Постановка задачи

Для моделирования характеристик сигналов ВНЗ, а именно: амплитуды, задержки, частоты, длительности сигнала, необходимо:

1. Знать текущие параметры ионосферы в районе входа луча на высоты ионосферы, то есть вертикальный профиль распределения электронной концентрации по высоте и их горизонтальные градиенты.
2. Знать характеристики диаграмм направленности передающей и приемной антенны на рабочей частоте.
3. Знать характеристики излученного радиосигнала.
4. Знать уровень активных естественных помех в районе приемной антенны.
5. Знать характеристики отражающей поверхности для декаметровых сигналов в районе падения луча на землю.
6. Выбрать модель расчета траектории распространения КВ сигналов вдоль заданной трассы распространения.
7. Выбрать модель расчета ослабления радиоволн КВ диапазона вдоль трассы локации.

Таким образом, в общем случае модель сигнала ВНЗ представляет собой функционал, зависящий от многих изменяющихся параметров:

$$P(\alpha, \varphi, \lambda, \tau, \Delta\tau) \cong F(I, W, \beta, \varepsilon, f, D, t, k...), \quad (1)$$

где  $P$  – параметры принятого сигнала ВНЗ;  $\alpha$  – амплитуда;  $\varphi$  – фаза;  $\lambda$  – длина волны;  $\tau$  – длительность сигнала;  $\Delta\tau$  – спектральные искажения сигнала;  $F$  – факториал, зависящий от состояния ионосферы –  $I$ ;  $W$  – ослабление сигнала на трассе локации;  $\beta, \varepsilon$  – азимут и угол места излучения;  $f$  – рабочая частота;  $D$  – дальность до объекта;  $t$  – год, сезон, время суток;  $k$  – коэффициент отражения подстилающей поверхности;  $\Delta\beta, \Delta\varepsilon$  – ширина диаграммы направленности в азимутальной и угломестной плоскостях и других составляющих.

Аппаратура для формирования качественных сигналов ВНЗ гораздо дороже стоимости других диагностических средств, сравнима по стоимости со станциями некогерентного рассеяния. Существующие средства диагностики параметров ионосферы показаны на Рис. 1.

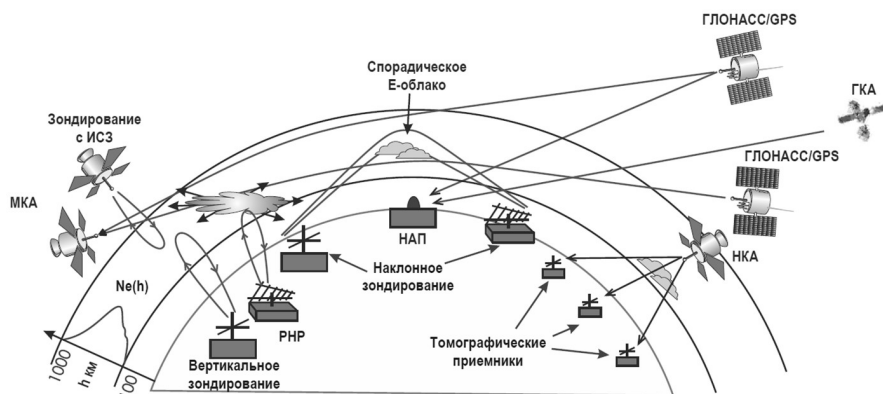


Рис. 1: Методы и средства радиозондирования ионосферы

Критериями эффективности средств диагностики ионосферы являются: непрерывность, глобальность, точность, достаточность, оперативность, стоимость.

Как видно из рисунка, в состав данных средств входят и станции формирования сигналов ВНЗ. Чаще всего сигналы ВНЗ формируются радарными загоризонтного обнаружения, где они, с одной стороны, являются пассивной помехой, а с другой – сигналом, несущим информацию, по которой можно оценить условия распространения радиосигналов на трассе локации. В частности, отсутствие данных сигналов может служить признаком невозможности выполнить поставленную задачу.

Для оценки траектории прихода сигналов ВНЗ, решения обратной задачи необходимо иметь узкие диаграммы направленности передающих и приемных антенн, а также возможность измерения углов места приходящих сигналов [8,9]. Известно, что размеры области спокойной среднеширотной ионосферы, для которой параметры остаются достаточно коррелированными, составляют порядка 500 км по

широте и 1000 км по долготе [1, 10], время стационарного состояния ионосферы составляет 10–15 минут. При магнито-ионосферных возмущениях вариации параметров ионосферы более быстрые, время стационарного состояния может уменьшаться до нескольких минут. Таким образом, сигналы ВНЗ могут служить индикатором текущей оценки состояния ионосферы, и по ним можно составить краткосрочный прогноз рабочих частот на время стационарного состояния спокойной ионосферы. Для прогнозирования на интервалы времени 0,5–1,0 часа и более для трасс различной ориентации необходимо использовать корректируемую в реальном масштабе времени глобальную модель ионосферы [10].

## 2. Общий подход к моделированию сигналов ВНЗ

В настоящее время существует большое число глобальных моделей ионосферы. Наиболее распространенные представлены в Таблице 1.

Таблица 1: Глобальные модели ионосферы

Модели	Интервалы высот	Базы данных	Выходные параметры
ITS-78, RAL, IONCAP	Ниже $h_m F2$	Станции ВЗ	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2$
Rush-Miller	Полный проф. $Ne(h)$ до 1000 км	Станции ВЗ	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2$
Bent, ICED	Полный проф. $Ne(h)$ до 1000 км	Станции ВЗ, ИСЗ	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2$
RIBG	Полный проф. $Ne(h)$ до 1000 км	Композиция моделей	Модели: ICED, Бента, Галлагхера
IRI	Полный проф. $Ne(h)$ до 1000 км	Станции ВЗ, РНР, ИСЗ (зонд., изм. $Ne(h)$ ), ракеты, поглощение радиоволн	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2, TEC, M(3000)F2, Ne$
NeQuick	Полный проф. $Ne(h)$ + плазмосф.	Станции ВЗ, измерения VTEC	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2, TEC, M(3000)F2$
IRI-Plas	Полный проф. $Ne(h)$ + плазмосф.	Станции ВЗ, РНР, ИСЗ (зонд., изм. $Ne(h)$ ), данные IRI	$h_m E, h_m F2, f_o E, f_o F2, TEC, M(3000)F2, Ne$

В зависимости от решаемых задач средствами КВ локации и связи применяют те или иные модели. Достаточно полное описание моделей приведено в [8–10]. Наиболее часто в различных работах используют международную модель IRI (International Reference Ionosphere). Однако, следует понимать, что модели могут дать лишь усредненные значения со своим среднеквадратичным отклонением от медианы. Как правило, для ионосферы принято прогнозировать среднемесячные значения критических частот и высот ионосферы в зависимости от уровня солнечной активности. Если эти прогнозы можно использовать для глобальной

оценки условий функционирования декаметровых средств, то для краткосрочных прогнозов они неприемлемы.

Для моделирования условий распространения декаметровых сигналов в различных направлениях, в первую очередь, необходимо иметь адекватную реальным гелиогеофизическим условиям модель ионосферы. Основные требования к корректируемой модели ионосферы следующие [9, 10]:

1. Глобальность – позволяет прогнозировать параметры ионосферы в любой точке земного шара (отсутствуют широтно-долготные ограничения).
2. Адаптивность – возможность коррекции модели по результатам диагностики одного или нескольких параметров ионосферы.
3. Возможность учета возмущенного состояния ионосферы.
4. Простота и высокая скорость расчетов.
5. Доступность – наличие в свободном доступе модели, справочных материалов и технической поддержки.

Кроме того, должна быть выбрана модель распространения радиоволн, с помощью которой рассчитываются возможные траектории сигналов ВНЗ на требуемых трассах, для различных гелиогеофизических условий с учетом пересчета дальности по лучу в дальность по земле.

Следующим этапом является расчет ослабления сигнала ВНЗ по откорректированной модели ионосферы на радиотрассе с учетом коэффициента отражения от подстилающей поверхности.

Последним этапом является оценка возможности выполнить поставленную задачу радиотехническим средством при наличии смоделированного сигнала ВНЗ в течение прогнозируемого интервала времени.

### **3. Методы решения задач, возникающих при моделировании сигналов ВНЗ**

Первым этапом при моделировании сигналов ВНЗ является выбор модели ионосферы, которую можно корректировать текущими измерениями на трассе локации. Для радиолиний одного направления задача упрощается. Если же, например, радиолокатор работает в секторе  $360^{\circ}$ , то необходимо предусмотреть возможность коррекции модели ионосферы в круговом секторе. В настоящее время разработаны методы коррекции глобальной модели ионосферы с помощью транс-ионосферного зондирования навигационными ИСЗ различного назначения [2, 3, 11].

Развитие радиотомографических методов определения параметров ионосферы, когда излучение сигналов осуществляется спутником, а приемники расположены на Земле, позволило осуществлять измерение параметров ионосферы в любом требуемом районе. Основным недостатком данного метода коррекции является то, что происходит уточнение максимума электронной концентрации и высоты слоя F2 ионосферы. Нижние слои ионосферы берутся по модели. Для уточнения параметров нижних слоев необходимо иметь данные вертикального зондирования (ВЗ) на нескольких направлениях, чтобы иметь возможность откорректировать модель

ионосферы снизу. Методика коррекции по данным ВЗ достаточно хорошо описана в ряде работ [8, 9, 12, 13] и проверена экспериментально. В общем случае при корректировке модельного распределения ионизации вдоль радиотрассы опорные станции ВЗ могут находиться как внутри, так и вне зоны распространения волны. Тогда для получения параметров модели вдоль трассы возникает необходимость в построении пространственных карт этих параметров на момент связи по нескольким произвольно расположенным точкам с известными экспериментальными данными. Многолетние исследования привели к появлению множества достаточно точных для практического применения методов решения этой задачи, основанных на пространственной корреляции параметров ионосферы. Наиболее точным методом восстановления пространственного распределения критических частот и высот ионосферных слоев является метод Кригинга [8, 9].

В практике ионосферного обеспечения требуется модель, которая способна быстро выдать значение электронной концентрации и полного электронного содержания от Земли и до высот 20–40 тыс.км, и которую можно адаптировать к изменениям солнечной активности. Для описания распространения электромагнитных волн в ионизированной среде удобны в применении модели ионосферы семейства IRI и NeQuick. Для ионосферного обеспечения радиотехнических средств рекомендуется отечественная модель IRI-Plas [14], учитывающая величину электронной концентрации на высотах до 20000 км.

Входными параметрами модели являются: географические или геомагнитные координаты (широта и долгота); дата, на которую производится расчет; время по Гринвичу (UT) и уровень солнечной активности. Как сказано выше, адаптационными параметрами модели являются  $f_0$ ,  $Ne(h)$  и  $TEC$ , а также индекс солнечной активности. Таким образом, оперативность и точность описания ионосферы (или ионосферного обеспечения) будет определяться оперативностью поставки адаптационных параметров и их качеством.

Трудности измерения «первичных» индексов SA (потока радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см -  $F_{10.7}$  или числа солнечных пятен – числа Вольфа  $W$ ) и необходимость оперативной оценки состояния ионосферы стали причиной построения «вторичных» индексов SA по рядам данных контроля параметров того же самого объекта, поведение которого необходимо прогнозировать. В частности, для прогноза ионосферного распространения радиоволн было предложено использовать ионосферный индекс солнечной активности (ИИСА).

Величины ИИСА определяются путем минимизации квадрата нормы невязки между значениями  $f_0$ ,  $h_m$ ,  $Ne(h)$  или  $TEC$ , рассчитанными по модели IRI-Plas, и соответствующими значениями, полученными от средств зондирования, где в качестве параметра оптимизации выступает ИСА  $W$  – число солнечных пятен или  $F_{10.7}$  – поток радиоизлучения Солнца в соответствии с выражением:

$$f_i(W) = [(P(\vec{r}_i, t_i) - P^{IRI-Plas}(\vec{r}_i, t_i, W_i))^2] \longrightarrow \min, \quad (2)$$

где  $P$  – измеряемый параметр ионосферы ( $f_0$ ,  $h_m$ ,  $Ne(h)$  или  $TEC$ );  $\vec{r}_i$  – географические координаты;  $t$  – момент времени, на который получены измерения.

Для расчета усредненного значения ИИСА, опираясь на (2), в качестве целевой функции выбрана сумма квадратов невязок по всем имеющимся наблюдениям

$TEC$  на расчетный момент времени:

$$f(W) = \sum_{i=1}^N [(TEC(t_i) - TEC^{IRI-Plas}(t_i, W_i))^2] \rightarrow min. \quad (3)$$

Каждое измеренное наклонное значение  $TEC$  с помощью функций наклона пересчитывается в вертикальное значение  $TEC$  ( $VTEC$ ) для подионосферной точки. Далее, опираясь на (2), находим ИИСА в подионосферной точке:

$$f_i(W) = [(VTEC(\vec{r}_i, t_i) - VTEC^{IRI-Plas}(\vec{r}_i, t_i, W_i))^2] \rightarrow min. \quad (4)$$

По совокупности найденных значений индекса путем интерполяции строится «карта» ИИСА, которая позволяет учитывать пространственные вариации ионосферы исследуемого региона.

Инфраструктура для глобальной модели ионосферы уже существует и действует в интересах широкозонных дифференциальных систем СРНС ГЛОНАСС/GPS [12, 13]. К настоящему времени достаточно широко распространены континентальные, региональные и локальные подсистемы. К континентальным, получившим название ШДС (Satellite Based Augmentation Systems (SBAS)), относят WAAS (Wide Area Augmentation System) (Северная Америка), EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) (Европа), GAGAN (GPS Aided Geo Augmented Navigation) (Индия), MSAS (Multi-Functional Satellite Augmentation System) (Япония) и СДКМ (Система дифференциальной коррекции и мониторинга) (Россия). Регионы покрытия навигационным полем таких подсистем показаны на Рис. 2.

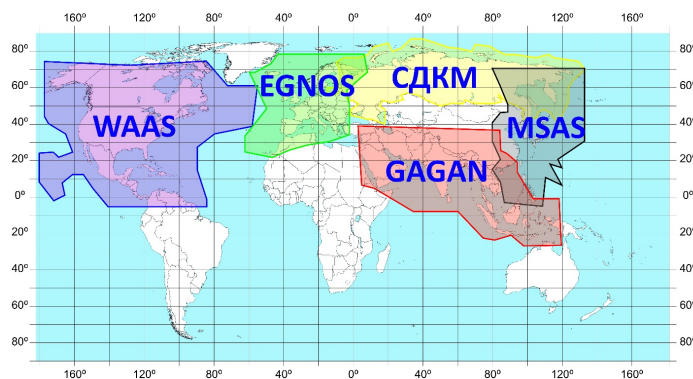


Рис. 2: Зоны действия и обслуживания систем SBAS

Для всех ШДС данные, характеризующие состояние ионосферы, представляются в виде значения ионосферных задержек в узлах пятиградусной сетки SBAS (Рис. 3).

Значения вертикальных ионосферных задержек, передаваемых в сообщениях с интервалом не более 5 минут, пересчитываются в ИИСА. В дальнейшем ИИСА используется при решении задачи оперативной коррекции параметров адаптивной модели ионосферы IRI-Plas.

Величины ИИСА определяются путем минимизации квадрата нормы невязки между рассчитанной по модели IRI-Plas задержкой  $\tau_V^{IRI-Plas}$  [м] и полученной в

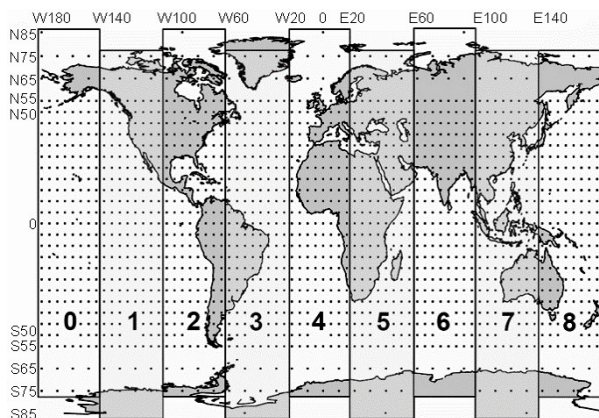


Рис. 3: Регулярная сетка SBAS

узлах сетки SBAS  $\tau_\nu^{SBAS}$  [м], где в качестве параметра оптимизации выступает ИСА  $W$  – число солнечных пятен или  $F_{10.7}$  – поток радиоизлучения Солнца в соответствии с выражением:

$$f(W) = [(\tau_\nu^{SBAS}(\vec{r}_i, t_i) - \tau_\nu^{IRI-Plas}(\vec{r}_i, t_i, W_i))^2] \rightarrow \min. \quad (5)$$

Для расчета модельного значения задержки (в метрах) в узлах выбранной координатной сетки используем модель ионосферы IRI-Plas.

$$\tau_\nu^{IRI-Plas} = \frac{40.308}{f_{L1}^2} \times TEC^{IRI-Plas}, \quad (6)$$

где  $f_{L1}$  – частота, для которой передаются рассчитанные поправки в узлах сетки SBAS ( $f_{L1} = 1575.42$  МГц).

В результате с использованием интерполяции внутри ячейки SBAS ( $5^\circ \times 5^\circ$ ) строится карта ИИСА, на основе которой IRI-Plas позволяет рассчитать значения любого параметра ионосферы в каждой точке региона.

Выбор ионосферного параметра для коррекции рассмотрен во многих работах [10, 12], показано, что наибольшее влияние имеют значения критической частоты и высоты слоя F2 (см. Таблицу 2).

Таблица 2: Вклады высотных областей в TEC (в %)

Высота слоя	01.01.2000 Иркутск				01.01.2000 Иркутск			
	6:00 LT	12:00 LT	18:00 LT	0:00 LT	6:00 LT	12:00 LT	18:00 LT	0:00 LT
От 0 до $h_m F2 - 100$ км	6	4	2	18	9	17	11	4
От $h_m F2 - 100$ км до $h_m F2 + 100$ км	47	58	47	34	65	58	59	50
От $h_m F2 + 100$ км до 2000 км	47	38	51	48	27	25	30	47



Сопоставление данных станций вертикального зондирования для рассматриваемого региона и восстановленных по скорректированной модели показало, что средняя погрешность составляет не более 10%, что допускает использование предложенного способа в качестве средств ионосферного обеспечения радиотехнических систем различного назначения [13].

Предложенная методика адаптации модели IRI-Plas позволяет определять параметры ионосферы (критическую частоту  $f_0F2$  и высоту максимума слоя  $F2 - h_mF2$ ) более точно, чем по модели IRI-Plas при задании общепланетарного  $W$  [15].

По откорректированной модели IRI-Plas осуществлялся расчет возможных траекторий сигналов КВ диапазона на заданной трассе.

Расчеты траекторий радиоволн осуществляются разными методами, среди которых можно выделить следующие:

1. Метод решения волнового уравнения в виде параболического уравнения [16].
2. Метод геометрической оптики, когда распространение радиоволн представляется в виде «скачков» лучевой траектории, типах мод для фиксированных в пространстве точек приема и передачи [17].
3. Метод решения волнового уравнения путем разделения переменных и учета периодичности по одной из координат. Общее решение задачи представляется в виде суммы ряда компонент, где один член суммы соответствует «нормальной» волне волновода. Поэтому этот метод известен как метод нормальных волн [18].
4. Метод адиабатического инварианта, позволяющей оценить лучевую траекторию, не прибегая к интегрированию вдоль траектории по всей трассе [19].

Различие этих методов определяется особенностью описания среды распространения, в первую очередь комплексной диэлектрической проницаемостью среды  $-\tilde{\epsilon}$ . В общем случае (с учетом магнитного поля)  $\tilde{\epsilon}$  является тензорной величиной, что проявляется во вращении плоскости поляризации и зависимости характеристик распространения от поляризации и направления волны. В простейшем случае:

$$\tilde{\epsilon} = 1 - \frac{4\pi N_e^2}{m_e \omega^2} \left( 1 + i \frac{\nu}{\omega} \right), \quad (7)$$

где  $\omega$  – круговая частота волны,  $N_e$  – концентрация электронов,  $\nu$  – частота столкновения электронов.

Действительная часть  $\tilde{\epsilon}$  определяет рефракцию радиоволны, мнимая – ослабление.

Таким образом, для моделирования ионосферного распространения необходимы модели пространственного распределения электронной концентрации –  $N_e$  и частоты столкновений электронов –  $\nu_e$ .

Модель распределения сезонно суточных вариации значений электронной концентрации корректируется данными  $TEC$  с темпом порядка 5 минут, значения частоты соударений электронов изменяются гораздо медленнее. Существует большая неоднозначность в модельных значениях  $\nu$  и экспериментальных на высотах области  $F2$ . В работе [20] была предложена простая формула расчета электронной

температуры  $-T_e$ , что позволило достаточно просто учитывать влияние частоты столкновения в слое  $F2$  при моделировании распространения радиоволн. Однако сравнение расчетных значений ослабления радиосигналов с экспериментальными [21] показало их значительную расхожимость, что затрудняет на данном этапе рассчитывать величины ионосферного ослабления, поглощения и рассеивания подстилающей поверхностью с достаточной для практики точностью.

Рассмотрим возможный подход к расчету отраженного от подстилающей поверхности сигнала ВНЗ.

#### 4. Результаты моделирования отражений от подстилающей поверхности сигналов возвратно-наклонного зондирования

Расчет амплитуды падающего на земную поверхность поля и характеристик рассеянного излучения проводится с использованием ранее разработанной в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЗФ СО РАН) методики моделирования сигналов при наклонном зондировании (НЗ) ионосферы [8, 9].

Согласно этой методике,  $j$ -ю компоненту поля излучателя с произвольным распределением тока в волноводе Земля-ионосфера в сферической системе координат с началом в центре Земли можно представить в виде ряда нормальных волн (8):

$$E_j(\vec{r}, t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{A}{y\sqrt{\sin\theta}} \sum_n (\gamma_n)^{-\frac{1}{2}} I_{nj}(\varphi) P_{nj}(\vec{r}) A_{nj}(\vec{r}) g_0(t - \tau_n(\vec{r})) e^{i\Phi_{nj}\vec{r} - i\omega_0 t} \right\}. \quad (8)$$

Здесь  $j = r, \theta, \varphi$ ;  $\gamma_n$ ,  $\tau_n(\vec{r})$ ,  $A_{nj}(\vec{r})$  и  $\Phi_{nj}(\vec{r})$  – спектральные составляющие (спектральный параметр), задержка, амплитуда и фаза нормальной волны с номером  $n$ ;  $g_0(t)$  – огибающая сигнала;  $I_{nj}(\varphi)$  – коэффициент возбуждения нормальных волн. Суммирование в (8) проводится с использованием условия стационарности фаз (разность фаз соседних нормальных волн кратна  $2\pi$  для ряда нормальных волн) [22].

Если размеры рассеивающей площадки земной поверхности малы по сравнению с шириной волновода и расстоянием до нее, то для характеристики ее рассеивающих свойств можно использовать коэффициент рассеяния. При этом связь между коэффициентом возбуждения нормальных волн и коэффициентом рассеяния  $\gamma(\alpha_i, \alpha_s)$  определяется формулой [6]:

$$I_n(\varphi) = \frac{C_n}{ka^3} cA_i \sqrt{\frac{\gamma(\alpha_i, \alpha_s) S \cos(\alpha_i)}{4\pi}} e^{-iZ_n}. \quad (9)$$

Здесь амплитуда падающего поля  $A_i$ , амплитудный множитель  $C_n$  и фаза радиальной функции  $Z_n$  рассчитываются на поверхности Земли, как если бы шероховатостей не было,  $\alpha_i$  и  $\alpha_s$  – углы падения и рассеяния соответственно,  $S$  – площадь рассеивающей площадки.

Таким образом, с помощью (8) и (9) можно рассчитать поле, рассеянное отдельной шероховатой площадкой земной поверхности, если задать ее коэффициент рассеяния. С точки зрения оперативности проведения расчетов коэффициент

рассеяния удобнее задавать в аналитической форме. Вопрос выбора тех или иных аналитических выражений для коэффициентов рассеяния и их соответствия различным типам земной поверхности рассмотрен в [22].

При ВНЗ ионосферы освещенная область земной поверхности простирается на тысячи километров, начиная от дальности мертвой зоны. Однако, в каждый конкретный момент времени из всей освещенной области засвечиваются только некоторые площадки, размеры которых определяются пространственной длиной зондирующего импульса  $\Delta P = \frac{c\Delta\tau}{2}$ , где  $\Delta\tau$  – длительность импульса,  $c$  – скорость света, и наклоном траектории распространения сигнала [23]. По зависимости групповой задержки приходящего к поверхности сигнала от дальности по Земле нетрудно оценить размеры таких площадок. На Рис. 4 показана такая зависимость для односкачкового сигнала в случае однослойной ионосферы. В момент времени  $\tau_1$ , освещаются две площадки: одна – верхним, а другая – нижним лучом. Обе площадки дают вклад в амплитуду принимаемого сигнала, но в разные моменты времени.

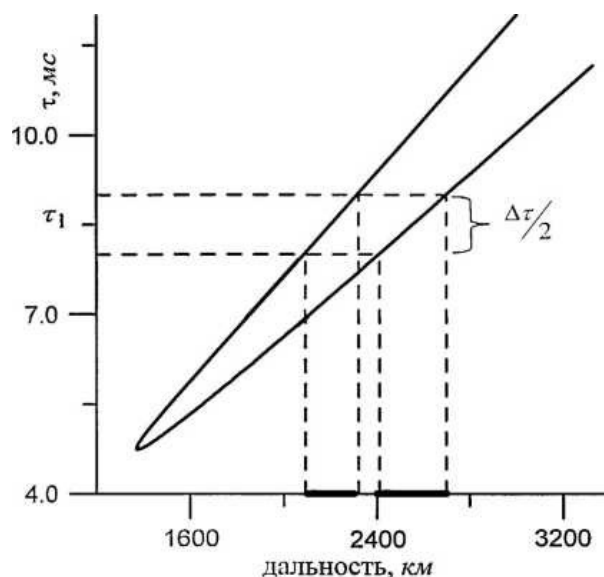


Рис. 4: Зависимость задержки от дальности в случае однослойной ионосферы

Таким образом, используя методику расчета, приведенную в работе [22], можно рассчитать амплитуду принимаемого сигнала ВНЗ, однако для этого нужно достаточно много входных данных, определяемых в реальном времени.

Рассмотрим возможности расчетов дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) сигналов ВНЗ на односкачковой трассе и сравним теоретические данные с экспериментальными, полученными на этой же трассе. В качестве экспериментальной трассы возьмем трассу Москва – Калининград [24].

ДЧХ представляет собой прямую линию – это одна из ее особенностей, определяющая выбор аппроксимации эмпирических данных для случая плоской земли. Дальность до границы зоны молчания, или минимальное расстояние по Земле, не может быть выражено в явном виде, но приближенно может быть заменено рассто-

янием, соответствующим лучу с минимальным временем запаздывания. Ошибка, которая при этом вносится, равна 10-20 км (для плоской земли и ионосферы), так что найденное этим способом расстояние будет несколько больше действительного. Расчетные и экспериментальные графики приведены на Рис. 5.

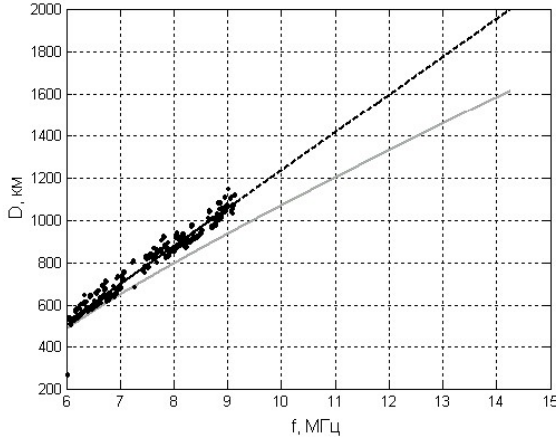


Рис. 5: Минимальное расстояние по Земле в зависимости от частоты (непрерывный график получен с использованием формулы, взятой из [25], прерывистый – экстраполяция эмпирических данных)

Формулы (10)-(11), приводимые ниже, представляют собой длину полного пути  $p$  луча и соответствующее расстояние по Земле  $D$  в условиях сферической Земли и сферической ионосферы с параболическим распределением электронов [25]:

$$p = p_1 + p_2 = 2xy_m \ln \frac{\left(1 - \frac{x^2}{R} y_m\right) \sqrt{1 - x^2 \left(1 - 2\frac{4-x^2}{R} y_m\right) \left(\frac{2h_0}{R} + \sin^2 \alpha\right)}}{1 - x \cos(i_0) \sqrt{1 - \frac{4}{R+h_0} y_m - \frac{x^2}{R+h_0} y_m}} + \frac{2R \sin(\pi/2 - \alpha - i_0)}{\sin(i_0)}, \quad (10)$$

$$D = D_1 + D_2 = \frac{R}{R + h_0} \sin(i_0 p_1) + 2R \left(\frac{\pi}{2} - \alpha - i_0\right), \quad (11)$$

где  $y_m$  – полутолщина слоя  $F2$  ионосферы,  $i_0$  – угол падения на ионосферу,  $\alpha = \arccos\left(\frac{R+h_0}{R} \sin(i_0)\right)$ ,  $R$  – радиус Земли ( $R = 6370$ ), групповые пути и расстояния по Земле  $p$  и  $D$  понятны из Рис. 6.

Как следует из выражений (10) и (11), для модели сферических Земли и ионосферы минимальное расстояние по лучу  $p_{min}$  и минимальное расстояние по Земле  $D_{zmin}$  не могут быть получены таким же простым путем, как в случае модели плоской Земли и параболической ионосферы. Практически обе характеристики находят графическим путем. На Рис. 7 представлены зависимости длин полного пути  $p$  луча от угла излучения  $\alpha$  при различных значениях параметра  $x = \frac{f}{f_{kr}}$ , которые позволяют определить  $\alpha_{pmin}$  [5]. Расчет производился с использованием

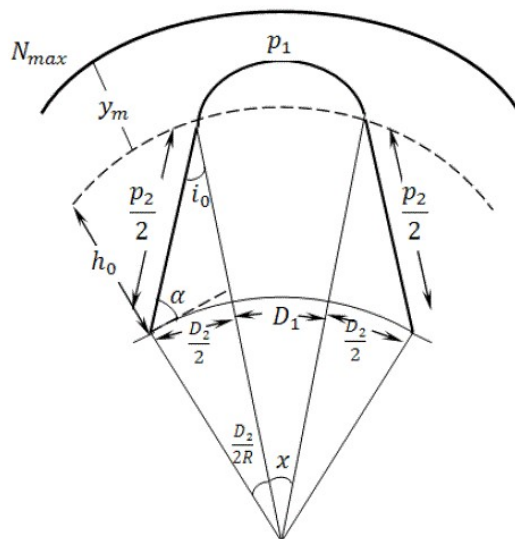


Рис. 6: Лучевая траектория в условиях сферической Земли и ионосферы

данных, полученных в результате ВНЗ по формуле (10). На графиках видно, что в достаточно широком секторе углов по обе стороны от  $\alpha_{p_{min}}$  расстояние  $p$  изменяется незначительно. Так как временное запаздывание сигнала пропорционально  $p$ , то энергия принятого сигнала резко нарастает в сравнительно небольшом временном интервале. Это является одной из причин того, что сигнал имеет крутой передний фронт, а это, в свою очередь, способствует достаточно точному определению времени запаздывания.

Близкие результаты наблюдались при экспериментальных работах с получением сигналов ВНЗ на ряде трасс в направлении Москва – Калининград. Для сферической Земли рост дальности с увеличением  $x$  начинает ускоряться, что вызвано сферичностью земной поверхности, а это ведет к изгибу ДЧХ. Как было показано в [5], по результатам расчетов можно для каждого значения параметра  $x$  определить угол  $\alpha_p$ , что позволяет рассчитать дальность пройденного пути по Земле для случая сферических Земли и ионосферы.

В практике текущей эксплуатации линий радиосвязи среднеквадратичное отклонение при экспериментальном определении МПЧ методом ВНЗ не превышает 3% [5].

Таким образом, задача моделирования дистанционно-частотных характеристик сигналов ВНЗ решается проще, чем задача моделирования амплитудного рельефа. Метод ВНЗ ионосферы позволяет определять дальность скачка, находить максимально применимую частоту для разных дальностей, изучать рассеивающие характеристики земной поверхности. Однако, следует понимать, что для использования всех возможностей данного метода необходимо иметь узкие диаграммы направленности как передающих, так и приемных антенн с электронным сканированием, что для данного диапазона волн весьма дорого.

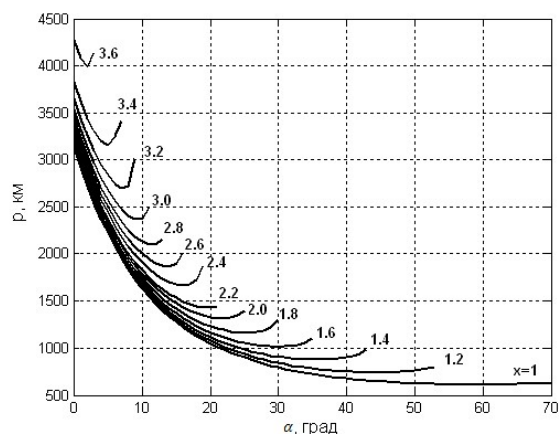


Рис. 7: Зависимость длины пути луча от угла излучения

## Заключение

Проведенный анализ работ по возможностям моделирования сигналов ВНЗ и сравнение модельных расчетов с экспериментальными данными на среднеширотных радиотрассах показали, что данная задача может быть математически решена, но результаты моделирования для практических целей могут быть использованы частично.

Для откорректированной модели ионосферы по данным трансионосферного и вертикального зондирования возможно моделировать дистанционно-частотные характеристики сигналов ВНЗ с достаточной точностью.

Расчеты максимально применимых частот по сигналам ВНЗ на трассах различной протяженности и ориентации дают приемлемые для практики результаты.

Для траекторных расчетов более приемлем метод нормальных волн по сравнению с методом геометрической оптики.

Расчеты ослабления сигналов ВНЗ на радиотрассе пока носят теоретический характер и для практических целей малопригодны.

Использовать сигналы ВНЗ для решения обратной задачи можно при наличии узких диаграмм направленности передающих и приемных антенн с возможностью электронного сканирования.

Единственно возможным методом решения данных проблем при использовании сигналов ВНЗ для оптимизации частотно-угловых режимов работы в загоризонтных радарх является корректная подгонка модельных расчетов к экспериментальным данным для модели ионосферы.

## Список литературы

- [1] Павельев А.Г., Урядов В.П., Яковлев О.И., Якубов В.П. Распространение радиоволн : учебное пособие М.: ЛЕНАНД, 2016. 496 с.

- [2] Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 336 с.
- [3] Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 208 с.
- [4] Хотенко Е.Н., Калинин Ю.К. Об информативности сигналов возвратно-наклонного зондирования ионосферы // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 4. С. 27–31.
- [5] Березовский В.А., Золотарев И.Д., Васенина А.А., Свешников Ю.К. Определение параметров КВ радиолинии по результатам возвратно-наклонного зондирования ионосферы // Вестник Омского университета. 2011. № 2. С. 98–102.
- [6] Ойнац А.В. О моделировании характеристик сигналов ВНЗ с учетом рельефа земной поверхности // Труды VIII Конференции молодых ученых. Секция «Физика околоземного космического пространства», БШФФ-2005. г. Иркутск, 2005. С. 118–120.
- [7] Акимов В.Ф., Калинин Ю.К., Слукин Г.П. Проблемы загоризонтного радиолокационного обнаружения и пути их преодоления // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2012. № 8. С. 5–17
- [8] Ойнац А.В. Численное моделирование характеристик декаметровых радиосигналов в рамках метода нормальных волн: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Иркутск, 2009. 153 с.
- [9] Шлюпкин А.С. Исследование эффективности применения международной модели ионосферы IRI-2001 для прогнозирования характеристик ВЧ радиосвязи: дисс. ... канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2007. 145 с.
- [10] Сажин В.И., Ивельская М.К., Вдовин Е.М., Голыгин В.А. Развитие полуэмпирической модели ионосферы и методов ее адаптации к текущей ситуации // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2014. Т. 8. С. 102–118.
- [11] Иванов В.Ф., Мысливцев Т.О., Ткачев Е.А., Троицкий Б.В. Мониторинг параметров ионосферы по данным навигационных измерений в СРНС ГЛОНАСС/GPS // Труды XXIV симпозиума по радиолокационному зондированию природных сред. Санкт-Петербург, 2006. № 6. С. 476–484.
- [12] Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Тасенко С.В. Восстановление трехмерного поля плотности электронов по результатам модельного эксперимента с участием бортового ионозонда и двух наземных ионозондов // Гелиогеофизические исследования. 2014. № 7. С. 43–55.
- [13] Алешкин А.П., Мысливцев Т.О., Никифоров С.В. Компенсация атмосферных погрешностей в алгоритмах обработки радиолокационных измерений на основе данных широкозонных дифференциальных систем спутниковой навигации

- // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 1. С. 25–31.
- [14] Гуляева Т.Л., Веселовский И.С. Реконструкция глобального электронного содержания в ионосфере и плазмосфере Земли в 10-24 циклах солнечной активности // Труды IX ежегодной конференции «Физика плазмы в Солнечной системе». М.: ИКИ РАН, 2014.
- [15] Черняков С.М. Создание адаптивной модели ионосферы на основе данных по полному электронному содержанию // Сборник научных трудов физико-математического факультета Мурманского государственного педагогического университета. М.: Изд-во МГПУ, 2003. С. 80–106.
- [16] Черкашин Ю.Н. Вычисление волновых полей в плавно-неоднородных средах методом параболического уравнения теории дифракции // Распространение дециметровых радиоволн. М.: ИЗМИРАН, 1980. С. 5–18.
- [17] Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. Сб. переводов под ред. Кияновского М.П. М.: Наука, 1971. 312 с.
- [18] Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 124 с.
- [19] Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. Сверхдальнее распространение коротких радиоволн М.: Наука, 1979. 250 с.
- [20] Деминов М.Г., Кубов В.И., Кубова Р.М. Простая эмпирическая модель частоты столкновения электронов в области F2. М.: ИЗМИРАН, 1985, препринт № 24 (557).
- [21] Алебастров В.А., Кубов В.И., Ржаницын В.П., Шустов Э.И. Моделирование сверхдального распространения дециметровых радиоволн. М.: «Новое Время», 2015. 167 с.
- [22] Попов В.Н., Потехин А.П. Структура поля импульсного сигнала дециметрового диапазона в волноводе земля-ионосфера // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1982. № 59. С. 68–76.
- [23] Финкельштейн М.И. Основы радиолокации. М.: Радио и связь, 1983. 436 с.
- [24] Куркин В.И., Орлов И.И., Пономарчук С.Н. Схема расчета характеристик КВ сигналов, рассеянных локализованными неоднородностями в волноводе Земля-ионосфера // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1990. № 92. С. 116–121.
- [25] Чернов Ю.А. О некоторых погрешностях в уравнении Эплтона-Бэйона для расстояния скачка // Радиотехника. 1959. Т. 24, № 3. С. 22.



**Библиографическая ссылка**

Волков Д.М., Злуницын О.И., Кочерова М.К., Талалаев А.Б., Тихонов В.В., Шишковая К.Г. Технология моделирования сигналов возвратно-наклонного зондирования в многослойной ионосфере // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 2. С. 123–143.

**Сведения об авторах****1. Волков Дмитрий Михайлович**

магистрант закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

**2. Злуницын Олег Игоревич**

магистрант закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

**3. Кочерова Марина Константиновна**

научный сотрудник закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

**4. Талалаев Александр Борисович**

генеральный директор закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

**5. Тихонов Владимир Васильевич**

старший научный сотрудник закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

**6. Шишковая Ксения Геннадьевна**

научный сотрудник закрытого акционерного общества «Радиотехнические и информационные системы воздушно-космической обороны».

*Россия, 170041, г. Тверь, ул. Зинаиды Коноплянниковой, д. 89, корпус 1, ЗАО «РТИС ВКО».*

## ON A SIGNAL MODELING TECHNIQUE FOR A BACK-INCLINED SENSING IN THE MULTILAYERED IONOSPHERE

**Volkov Dmitry Mihailovich**

Master student, Closed Joint Stock Company "Radio Engineering and Information Systems for Aerospace Defense".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

**Zlunicyn Oleg Igorevich**

Master student, CJSC "RTIS VKO".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

**Kocherova Marina Konstantinovna**

Researcher, CJSC "RTIS VKO".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

**Talalaev Aleksandr Borisovich**

CEO, CJSC "RTIS VKO".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

**Tikhonov Vladimir Vasilievich**

Senior Researcher, CJSC "RTIS VKO".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

**Shishkovskaya Ksenia Gennadievna**

Researcher, CJSC "RTIS VKO".

*Russia, 170041, Tver, 89 Zinaidy Konopliannikovoy str., block 1, CJSC "RTIS VKO"*

---

*Received 26.05.2016, revised 03.06.2016.*

---

This paper investigates the possibility of applying signals to a reciprocating inclined sensing (RIZ) for solving problems of diagnostics of propagation conditions of radio waves of decameter range. The advantages and disadvantages of this type of signals when using them as diagnostic tools. Based on the analysis of works on the use of these signals as a means of information about the ionosphere proposed a common method of the modeling of signals (RIZ) on tracks of different orientation and length.

**Keywords:** ionosphere, diagnostics characteristics of the ionosphere, ionospheric model, decameter range of waves, satellite radio navigation system (SRNS), navigation system GLONASS, the system of differential correction and monitoring (SDCM), the conditions of radio wave propagation.

### Bibliographic citation

Volkov D.M., Zlunicyn O.I., Kocherova M.K., Talalaev A.B., Tikhonov V.V., Shishkovskaya K.G. On a signal modeling technique for a back-inclined sensing in the multilayered ionosphere. *Vestnik TvGU. Seriya: Prikladnaya Matematika* [Herald

of Tver State University. Series: Applied Mathematics], 2016, no. 2, pp. 123–143. (in Russian)

### References

- [1] Pavel'ev A.G., Urjadov V.P., Jakovlev O.I., Jakubov V.P. *Rasprostranenie radiovoln. Uchebnoe posobie* [The Propagation of Radio Waves. Handbook]. LENAND Publ., Moscow, 2016. 496 p. (in Russian)
- [2] Kunicyn V.E., Tereshhenko E.D., Andreeva E.S. *Radiotomografija Ionosfery* [Radiotomography of the Ionosphere]. FIZMATLIT Publ., Moscow, 2007. 336 p. (in Russian)
- [3] Jakovlev O.I., Pavel'ev A.G., Matjugov S.S. *Sputnikovyj Monitoring Zemli: Radiozatzmennyj Monitoring Atmosfery i Ionosfery* [Satellite Monitoring of the Earth: Radio Occultation Monitoring of Atmosphere and Ionosphere]. LIBROKOM Publ., Moscow, 2014. 208 p. (in Russian)
- [4] Khotenko E.N., Kalinin Y.K. On the information content of signals backscatter ionospheric sounding. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education], 2012, no. 4, pp. 27–31. (in Russian)
- [5] Berezovsky V.A., Zolotarev I.D., Vasenina A.A.1, Sveshnikov Yu.K. Defenition of parametres of the hf-line by results of backscatter ionospheric sounding. *Vestnik Omskogo universiteta* [Herald of Omsk University], 2011, no. 2, pp. 98–102. (in Russian)
- [6] Oinats A.V. On modeling of characteristics of signals of oblique back scatter sounding with consideration for ground relief. *Trudy VIII Konferencii molodyh uchenyh. Sekcija «Fizika okolozemnogo kosmicheskogo prostranstva», BShFF-2005* [Proceedings of the VIII conference of young scientists. Section “Physics of near-earth space”, BShFF-2005]. Irkutsk, 2005, pp. 118–120. (in Russian)
- [7] Akimov V.F., Kalinin Yu.K., Slukin G.P. Problems of over-the-horizon radar detection and means to overcome them. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroenie* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering], 2012, no. 8, pp. 5–17. (in Russian)
- [8] Ojnac A. V. *Chislennoe Modelirovanie Harakteristik Dekametrovyh Radiosignalov v Ramkah Metoda Normal'nyh Voln* [Numerical Simulation of Characteristics of Decameter Radio Signals in the Framework of the Method of Normal Waves]. PhD Thesis. Irkutsk, 2009. 153 p. (in Russian)
- [9] Shljupkin A.S. *Issledovanie Effektivnosti Primenenija Mezhdunarodnoj Modeli Ionosfery IRI-2001 Dlja Prognozirovaniya Harakteristik VCh Radiosvjazi* [A study of the Effectiveness of the International Ionospheric Model IRI-2001 for Predicting the Characteristics of HF Radio Communications]. PhD Thesis. Rostov-na-Donu, 2007. 145 p. (in Russian)

- [10] Sazhin V.I., Ivelskaya M.K., Vdovin E.M., Golygin V.A. Evolution of semi-empirical ionosphere model and the development of model's adaptation methods for current situation. *Izvestiya Irkutskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Nauki o Zemle* [Bulletin of Irkutsk State University. Series: Earth Sciences], 2014, vol. 8, pp. 102–118. (in Russian)
- [11] Ivanov V.F., Myslivcev T.O., Tkachev E.A., Troickij B.V. Monitoring of the ionospheric parameters in the navigation data of measurements in the SRNS GLONASS/GPS. *Trudy XXIV Simpoziuma po Radiolokacionnomu Zondirovaniyu Prirodnih Sred* [Proceedings of the XXIV Symposium on Radar Sensing of Natural Environments]. St. Petersburg, 2006, no. 6, pp. 476–484. (in Russian)
- [12] Danilkin N.P., Zbankov G.A., Tsenko S.V. Recovery of the three-dimensional field of the electron density based on the results of a model experiment involving a satellite ionosonde and two ground-based ionosondes. *Geliogeofizicheskie Issledovaniya* [Heliogeophysical research], 2014, no. 7, pp. 43–55. (in Russian)
- [13] Aleshkin A.P., Myslivtsev T.O., Nikiforov S.V. Compensation for atmosphere-induced errors in evaluation of space object trajectory on the base of data from functional applications to GLONASS/GPS. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering], 2016, vol. 1(1), pp. 25–31. (in Russian)
- [14] Gulyaeva T.L., Veselovsky I.S. Reconstruction of global electron content in the ionosphere and the plasmasphere of the Earth in 10-24 cycles of solar activity. *Devjataja Ezhegodnaja Konferencija «Fizika Plazmy v Solnechnoj Sisteme»* [Ninth Annual Conference “Physics of Plasma in Solar System”]. Moscow, IKI RAN, 2014. (in Russian)
- [15] Cherniakov S.M. Creation of an adaptive model of the ionosphere using total electron content data. *Sbornik Nauchnyh Trudov Fiziko-Matematicheskogo Fakul'teta Murmanskogo Gosudarstvennogo Pedagogicheskogo Universiteta* [Proceedings of Scientific Works of the Physical-Mathematical Faculty of the Murmansk State Pedagogical University], 2003, pp. 80–106. (in Russian)
- [16] Cherkashin Ju.N. Computation of wave fields in smoothly inhomogeneous media by the method of parabolic equation of diffraction theory. *Rasprostranenie Dekametrovykh Radiovoln* [Propagation of Decameter Radio Waves]. IZMIRAN Publ., Moscow, 2015. Pp. 5–18. (in Russian)
- [17] *Luchevoe Priblizhenie i Voprosy Rasprostraneniya Radiovoln* [The Ray Approximation and Problems of Radio Wave Propagation]. Ed. by M.P. Kijanowska. Nauka Publ., Moscow, 1971. 312 p. (in Russian)
- [18] Kurkin V.I., Orlov I.I., Popov V.N. *Metod Normal'nyh Voln v Probleme Korotkovolnnoj Radiosvjazi* [The Method of Normal Waves in the Problem of Short-Wave Radio]. Nauka Publ., Moscow, 1981. 124 p. (in Russian)
- [19] Gurevich A.V., Cedilina E.E. *Sverhdal'nee Rasprostranenie Korotkih Radiovoln* [Long Range Propagation of Short Radio Waves]. Nauka Publ., Moscow, 1979. 250 p. (in Russian)

- 
- [20] Deminov M.G., Kubov V.I., Kubova R.M. *Prostaja Empiricheskaja Model Chastoty Stolknovenij Elektronov v Oblasti F2* [A Simple Empirical Model of Electron Collision Frequency in the Region F2]. IZMIRAN Publ., Moscow, 1985, preprint № 24 (557). (in Russian)
- [21] Alebastrov V.A., Kubov V.I., Rzhanicyn V.P., Shustov Je.I. *Modelirovanie Sverhdal'nego Rasprostraneniya Dekametrovyh Radiovoln* [Modeling of the Long-Distance Propagation of Decameter Radio Waves]. «Novoe Vremja» Publ., Moscow, 2015. 167 p. (in Russian)
- [22] Popov V.N., Potehin A.P. The structure of the field pulse signal decameter range in waveguide earth-ionosphere. *Issledovanija po Geomagnetizmu, Aeronomii i Fizike Solntsa* [Researches on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics], 1982, vol. 59, pp. 68–76. (in Russian)
- [23] Finkel'shtejn M.I. *Osnovy Radiolokacii* [Bases Radiolocation]. Radio i svjaz' Publ., Moscow, 1983. 436 p. (in Russian)
- [24] Kurkin V.I., Orlov I.I., Ponomarchuk S.N. Scheme for calculation of characteristics of HF signals scattered by localized inhomogeneities in the waveguide Earth-ionosphere. *Issledovanija po Geomagnetizmu, Aeronomii i Fizike Solntsa* [Researches on Geomagnetism, Aeronomy and Solar Physics], 1990, vol. 92, pp. 116–121. (in Russian)
- [25] Chernov Ju.A. Some of the errors in the equation the Appleton-Baiona for distance jump. *Radiotekhnika* [Radiotechnics], 1959, vol. 24(3), p. 22. (in Russian)