

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В АРКТИЧЕСКОМ РЕГИОНЕ

Т.Д. БОРИСОВА, Н.Ф. БЛАГОВЕЩЕНСКАЯ, А.С. КАЛИШИН

ГНЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: borisova@aari.ru

Представлены результаты исследований закономерностей ионосферного распространения декаметровых радиоволн, основанных на результатах экспериментальных измерений характеристик распространения радиоволн методом наклонного зондирования ионосферы (НЗИ) и данных численного моделирования. Описан алгоритм численного моделирования траекторных и энергетических характеристик процессов распространения декаметровых радиоволн в рамках метода геометрической оптики. Продемонстрировано соответствие рассчитанных по модели разработанного КВ-радиоканала и измеренных экспериментально параметров распространения радиосигнала (например, значений максимально наблюдаемых частот). Предлагается использовать разработанную диагностическую модель КВ-радиоканала для целей прогнозирования в высокоширотных районах, не обеспеченных станциями НЗИ.

Ключевые слова: высокоширотная ионосфера, наклонное зондирование ионосферы, распространение декаметровых радиоволн, моделирование радиоканала, диагностика и прогнозирование КВ-радиоканала.

ВВЕДЕНИЕ

Диагностику и прогнозирование состояния ионосферных радиоканалов целесообразно осуществлять непосредственно по результатам мониторинга и анализа условий распространения декаметровых радиоволн на системе радиотрасс. Наклонное зондирование ионосферы (НЗИ) является одним из эффективных методов. Оно осуществляется в режиме плавной или дискретной перестройки частоты излучения в декаметровом диапазоне частот. Информация, получаемая методом НЗИ в виде ионограмм — дистанционно-частотных характеристик, отражает реальную картину условий распространения радиоволн на конкретной радиотрассе и дает возможность определить основные параметры распространения декаметровых радиосигналов, например: диапазон частот (максимальные и наименьшие наблюдаемые частоты, МНЧ и ННЧ), способы (моды) распространения, многолучевость, временные задержки между модами, аномальные механизмы распространения (отклонение радиоволн от дуги большого круга, распространение за счет отражающих свойств спорадических слоев Es и т.д.). На основе данных НЗИ могут успешно решаться прикладные задачи радиомониторинга, прогнозирования состояния радиоканалов и повышения надежности и качества КВ-радиосвязи. Система НЗИ позволяет наблюдать текущее состояние радиоканала, тенденцию развития его параметров, что является основой краткосрочного прогнозирования. Особое значение системы НЗИ приобретают в периоды магнитно-ионосферных возмущений. Наблюдения показали, что в такие

периоды существенно изменяется диапазон рабочих частот, особенно на высокоширотных радионаправлениях.

Целенаправленное изучение свойств радиоканалов в зависимости от гелиогеофизических условий с учетом разного типа возмущений (искусственных и естественных) в ионосфере имеет важное значение, связанное с решением ряда практических задач, основанных как на экспериментальных данных, так и на результатах численного моделирования процессов распространения декаметровых радиоволн.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В данной работе рассмотрены данные наклонного зондирования ионосферы НЗИ, полученные в Арктическом и антарктическом научно-исследовательском институте (ААНИИ) на сети радиотрасс в арктическом регионе различной протяженности и ориентации. Схема расположения трасс НЗИ показана на рис. 1.

Прогнозирование условий распространения КВ-радиосигналов на трассах развивается в различных направлениях. Одним из основных методов массового радиопрогноза по-прежнему является модельный. Для реализации модельного прогноза на долгосрочной или краткосрочной основе необходимо знание параметров среды распространения (например, представление ее параметров в виде модели ионосферы) и модели распространения радиоволн. Результаты многочисленных исследований показали, что при модельном прогнозе основные ошибки прогнозирования обусловлены моделью ионосферы, которая неадекватно описывает пространственно-временные вариации состояния ионосферы. Поэтому для повышения точности радиопрогнозирования необходимо совершенствовать модели ионосферы (например, в качестве входного параметра модели использовать не только уровень солнечной активности W или $F10.7$, но и магнитной активности).

Наиболее перспективно осуществлять диагностику и прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн непосредственно по результатам мониторинга на сети трасс наклонного зондирования ионосферы. При этом следует учитывать, что время стационарности спокойной среднеширотной ионосферы порядка 1 часа, а для высокоширотной ионосферы — минуты. Поскольку данные НЗИ можно получать в реальном времени, то вести оперативный прогноз по ним можно с достаточно высокой эффективностью, используя уравнения линейной регрессии.

Использование данного метода диагностики и прогнозирования требует оснащения регионов контроля системами НЗИ, что, несмотря на высокую эффективность,

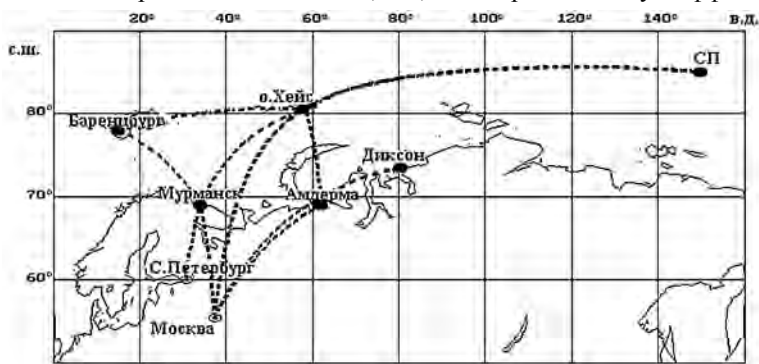


Рис. 1. Схема расположения радиотрасс наклонного зондирования ионосферы.

в реальных условиях не всегда выполнимо. Поэтому для целей краткосрочного прогнозирования условий распространения декаметровых радиоволн в регионах, не оснащенных станциями НЗИ, представляется целесообразным использовать модельный прогноз с коррекцией моделей ионосферы и декаметрового радиоканала по реальным данным наклонного зондирования ионосферы, выполняемого на однотипных радиотрассах, оснащенных системами НЗИ.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВ РАДИОКАНАЛОВ

Постоянно совершенствуются методы диагностики и прогнозирования состояния радиоканалов по характеристикам распространения радиоволн декаметрового диапазона. Одним из путей решения этой задачи является создание диагностических моделей радиоканалов. Комплексное использование численного моделирования и результатов экспериментальных измерений параметров радиосигналов на нескольких радиотрассах (с привлечением гелиогеофизических данных о состоянии околоземного пространства) при получении удовлетворительного соответствия между ними создает возможность выявления основных закономерностей взаимосвязи параметров среды и радиосигнала, используемых в диагностике и прогнозировании состояния ионосферы. Особенно это относится к районам, в которых нет сети ионосферных станций.

Для изучения особенностей распространения радиоволн декаметрового диапазона в различных районах Земли в ААНИИ был разработан алгоритм численного моделирования канала распространения КВ-радиоволн. Для получения численных значений ряда характеристик декаметровых каналов связи разрабатывается программное обеспечение для расчета таких параметров радиосигналов, как: максимально применимая частота (МПЧ), диапазон оптимальных рабочих частот, углы места на приемной и передающей позициях, уровень напряженности электромагнитного поля приемного сигнала и т.д.

Физика распространения радиоволн КВ-диапазона основывается на ряде экспериментальных и теоретических работ (Ландау, Лифшиц, 1982; Альперт, 1972). Как правило, в теории распространения коротких радиоволн используют ряд упрощений, связанных с особенностями строения ионосферы. Отношение гирочастоты электронов ω_g к рабочей частоте сигнала f_p КВ-диапазона преимущественно $\omega_g/f_p \ll 1$. В этом случае в первом приближении эффектами магнитного поля Земли можно пренебречь и рассматривать ионосферу как изотропную плазму. Кроме того $v_e/2\pi f_p \ll 1$, где v_e — частота соударений электронов. С учетом вышесказанного показатель преломления среды n записывается в простой форме

$$n^2 = 1 - 4\pi e^2/mNe/f_p^2,$$

где e , m — заряд и масса электрона, Ne — концентрация электронов в ионосфере.

В электродинамике поведение электромагнитных волн в изотропной неоднородной среде (Ландау, 1982), в предположении, что волновое поле $U(t, r)$ — скалярное и монохроматическое, т.е. $U(t, r) = U(r)\exp(-i2\pi f_p \cdot t)$, описывается уравнением Гамильтона

$$\Delta U(r) + k_0^2 \cdot n^2(r) \cdot U(r) = 0,$$

где $k_0 = 2\pi f_p/c$ — волновое число в вакууме, r — радиус-вектор, направленный из центра Земли, $|r| = R_3 + h$.

При анализе волновых полей КВ-радиосигналов в неоднородных средах важную роль играет метод геометрической оптики (ГО). Согласно методу ГО распространение

волн характеризуется лучами и ортогональными им фронтами. Кроме того, в ГО лучи образуют лучевые трубки и энергия течет вдоль них. В работах (Дебай, 1931; Рытов, 1938) изложен переход от точных волновых уравнений к более простым уравнениям ГО, описывающим лучевые характеристики волны (уравнение эйконала) и перенос энергии вдоль лучевой трубки.

В произвольной двумерной или трехмерной неоднородной среде уравнения лучей не могут быть решены аналитически. В связи с этим стали интенсивно развиваться численные методы решения уравнения ГО, в том числе численные методы расчета лучевых траекторий. Прямой численный метод решения системы дифференциальных уравнений Гамильтона в произвольной трехмерно-неоднородной среде был предложен Дж. Хазельгровом (Хазельгров, 1980). Расчет параметров распространения радиоволн на (достаточно протяженных) трассах данным методом сопряжен с большим объемом вычислений, необходимых для численного интегрирования уравнений ГО.

Существенного расширения возможностей ГО удалось достичь применением приближенных методов решения лучевых уравнений. Многочисленность параметров, влияющих на распространение радиоволн, и недостаток информации об ионосфере затрудняют получение точного решения. Сопоставление данных экспериментов с расчетом оказывается затруднительным вследствие неоднозначности интерпретации. В таких условиях особую ценность приобретают приближенные методы, существенно огрубляющие физику распространения радиоволн и выделяющие взаимосвязь ионосферных параметров и характеристик сигналов.

На этом пути в настоящее время разработан ряд методик, в том числе метод адиабатического инварианта (Гуревич, Цедилина, 1979) и его дальнейшее развитие метод двухмасштабного разложения (Баранов и др., 1977; Баранов, Попов, 1975), метод параболического уравнения, метод нормальных волн.

Для моделирования КВ-радиоканалов применительно к условиям распространения радиоволн на трассах произвольной протяженности и ориентации в ААНИИ был поставлен и усовершенствован метод двухмасштабного разложения.

Учет горизонтальной неоднородности ионосферы в математической постановке задачи распространения радиоволн приводит к проблеме определения решения векторного волнового уравнения в трехмерной неоднородной среде. Учитывая малость продольных градиентов распределения электронной концентрации ионосферы — N_e по сравнению с высотными (радиальными) градиентами, можно использовать адиабатическое приближение. В данном методе предполагается, что лучевые траектории распространения радиоволн в реальном приземном волноводе являются следствием двух процессов: быстрых осцилляций и медленных эволюций параметров осцилляций. Наличие двух масштабов изменения электронной концентрации: быстрого по вертикали и сравнительно плавного по горизонтали — оправдывает применимость таких представлений для описания лучевых траекторий. В работах (Баранов и др., 1977; Баранов, Попов, 1975), асимптотическое решение волновых уравнений получено на основе метода двухмасштабного разложения и дано строгое обоснование использования адиабатического инварианта для построения лучевых характеристик. С помощью данного метода были получены явные формулы для горизонтальных проекций лучей и выражения для амплитуды поля, и таким образом можно рассчитывать многие траекторно-энергетические характеристики распространения КВ-радиосигналов.

На основе метода двухмасштабного разложения был разработан алгоритм, по которому можно рассчитывать характеристики лучевых траекторий сигналов в неоднородной вдоль направления распространения ионосфере, при условии сохранения фазового интеграла адиабатического инварианта луча

$$\int \frac{\sqrt{n^2 r^2 - V^2}}{r} dr = const,$$

где V — постоянная интегрирования.

За основу описания пространственно-временных изменений электронной концентрации ионосферы — среды распространения радиоволн взята глобальная модель ионосферы, построенная на основе объединения известных моделей отдельных ионосферных слоев E, F1, F2 и межслоевых долин (Чернышев, Васильева, 1975; Ануфриева, Шапиро, 1976; Rawer et al., 1978). Входным параметром совокупной модели ионосферы является предложенный в (Благовещенский, Борисова, 1989) эффективный аналог числа Вольфа. Он учитывает влияние на распределение $Ne(h)$ вдоль трассы не только солнечной, но также и магнитной активности, заданной планетарным индексом Kp .

В работах (Борисова и др., 1986; Borisova et al., 2002; Борисова, 2014) описан созданный алгоритм численного моделирования траекторных и энергетических характеристик процессов распространения декаметровых радиоволн в рамках приближения двухмасштабного разложения метода геометрической оптики, учитывающего плавные горизонтальные неоднородности ионосферы.

При вычислении характеристик распространения радиоволн в неоднородной ионосфере на конкретном шаге интегрирования параметры ионосферы считаются постоянными. Высотный профиль изменения электронной концентрации $Ne(h)$ в разработанном алгоритме представлен набором отрезков квазипарабол с непрерывными значениями как самих функций $Ne(h)$, так и первых ее производных $dNe(h)/dh$ в местах соединения. Параметры описания слоев E, F и межслоевой долины берутся по данным имеющейся теоретической модели ионосферы. Введенная квазипараболическая аппроксимация $Ne(h)$ -профиля допускает точное интегрирование уравнения эйконала.

Доплеровский сдвиг частоты КВ-радиосигнала по определению есть

$$f_d = \left. \frac{dP}{dt} \cdot \frac{f_p}{C} \right|_{D=const},$$

где f_p — рабочая частота сигнала, P — фазовый путь, C — скорость света, D — дальность трассы.

Расчеты по этой формуле требуют решения двухточечных задач для двух моментов времени с высокой точностью пристрелки ($< 0,01$ км), что приводит к значительному увеличению времени счета f_d .

В (Болдовская, 1977) предлагается рассчитывать f_d по формуле

$$f_d = \left. \frac{f_p}{C} \cdot \frac{d(P - D \cos \beta)}{dt} \right|_{\beta=const},$$

где β — угол выхода.

В данном приближении ищется решение двухточечной задачи для одного момента времени, а для второго момента времени P и D рассчитывают для найденного угла β . Формула справедлива при малых градиентах распределения ионосферной

ионизации. Ее использование позволяет сократить время вычислений f_d , однако для получения необходимой точности решения f_d не хуже 0,05 Гц точность решения двухточечной задачи должна быть лучше, чем 0,01 км.

Использование сплайна, состоящего из отрезков квазипарабол, для описания профиля ионизации ионосферы $Ne(h)$ позволяет найти точные интегралы вычисления f_d .

Для расчета параметров описания процесса распространения КВ-сигналов на произвольно ориентированных радиотрассах для различных гелиогеофизических условий были разработаны алгоритм вычислений непосредственных характеристик распространения и сервисные программы ввода начальных значений параметров и вывода результатов вычислений.

Управляющими параметрами алгоритма являются следующие: географические координаты конечных пунктов радиотрасс; дата и время суток; уровень солнечной активности, заданный в числах Вольфа (W); уровень магнитной активности, заданный индексом магнитной активности (Kp); рабочая частота; диаграммы направленности приемной и передающей антенн в вертикальной плоскости.

В модели радиоканала предусмотрены возможности коррекции распределения электронной ионизации ионосферы вдоль радиолинии, основанной на сравнении рассчитанных и экспериментальных параметров радиосигналов КВ-диапазона.

Возможности удовлетворительного описания экспериментально измеренных характеристик радиоволн с помощью метода двухмасштабного разложения продемонстрированы в ряде работ, например (Благовещенский, Борисова, 1989; Borisova et al., 2002; Благовещенская и др., 1991).

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве примера использования модели радиоканала на рис. 2 приведены результаты экспериментально измеренных методом наклонного зондирования значений максимально наблюдаемых частот (ФМНЧ) на трассе Москва — станция «Северный полюс» и рассчитанные значения ФМНЧ для этой же трассы по модели. Данные из-

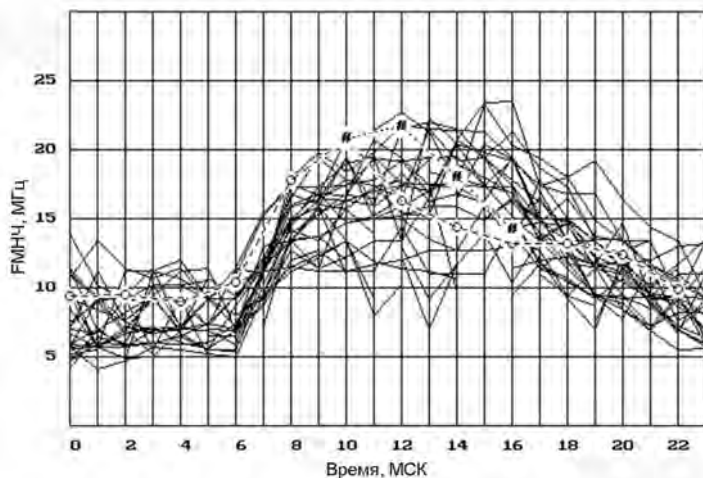


Рис. 2. Результаты экспериментально измеренных методом наклонного зондирования ионосферы (—) и рассчитанных по модели КВ-радиоканала (--o--, ·#·) значений максимально наблюдаемых частот на трассе Москва — станция «Северный полюс», 15 октября 1975 г.

мерений представлены в виде отдельных суточных зависимостей $FMHЧ(t)$ за октябрь 1975 г. (тонкие линии). Моделирование временной зависимости $FMHЧ(t)$ на данной трассе проведено для 15 октября 1975 г. Входной параметр модели ионосферы $Wэ = 90$ (измеренные значения параметров описания геофизических условий составили: для солнечной активности — $W = 25$ и для магнитной активности — $Kp = 0+$ (среднее значение трехчасового индекса)). Результаты первичных расчетов $FMHЧ(t)$ нанесены линией --o--. Согласно модели распространение радиоволн МНЧ реализовывалось на трассе Москва — станция «Северный полюс» модом 2F2, что соответствует данным наклонного зондирования ионосферы.

Сравнительный анализ данных показал приемлемое соответствие рассчитанных и измеренных значений $FMHЧ$, за исключением времени с 12 до 17 часов. Как показали расчеты, в это время суток в области отражения второго скачка мода 2F2 располагается вечерний терминатор, а распределение электронной концентрации ионосферы вдоль радиолинии имеет существенный регулярный градиент, который способствует захвату волн в ионосферный волновой канал (ИВК) на регулярных продольных градиентах ионосферы. Можно предположить, что прием сигналов более высоких частот в период с 12 до 17 часов возможен только за счет вывода радиоволн из ИВК на ночной стороне. Сам механизм вывода из ИВК непосредственно обусловлен ионосферными неоднородностями в областях терминатора и полярной ионосферы. На рис. 2 показаны результаты моделирования $FMHЧ$ (линия ·#·), выполненные в предположении, что в районе терминатора в полярной ионосфере слоя F2 существуют очень сильные градиенты электронной ионизации. Как видно из сравнения данных, $FMHЧ$, рассчитанные при учете дополнительных градиентов лучше описывают ход измеренных $FMHЧ$.

По разработанному алгоритму проведены в качестве примеров численные расчеты характеристик КВ-сигналов для различных гелиогеофизических условий на выбранных трассах (заданной ориентации и протяженности). Приведены примеры моделирования углов места радиосигналов на трассе «Лондон — Север Норвегии» и «Лондон — Дуала (Африка)». Расчеты сделаны для интервала времени — сутки (15 марта), года средней солнечной активности ($Wэ = 100$) и рабочей частоты $f_p = 10$ Мгц. На рис. 3а (см. цвет. вклейку) представлены численные зависимости углов места в течение суток и уровня поля в месте приема (в мкв/м, логарифмический масштаб) как для отдельных модов (отмечены знаком «←»), так и для суммарного поля в месте приема (значок □). Расчеты показывают наличие мод при отражении от слоя E — 1E (обозначение 2) и слоя F2 (обозначение 1): 1F2(1), 2F2(11), 3F2(111) и 4F2 (1111). Для тех моментов времени, когда рабочая частота $f_p = 10$ Мгц превышала значение максимально наблюдаемой частоты ($FMHЧ$) при вычислении, сделана отметка на графике ($> F_{max}$). На рис. 3б (см. цвет. вклейку) показан пример моделирования углов места радиосигналов для трассы «Лондон — Дуала (Африка)» для аналогичных гелиогеофизических условий. Отметим наличие модов распространения радиосигналов с отражением от ионосферного слоя F1 (обозначение 4). Как видно из расчетов, в период с 13 до 18 часов МДВ нет значений углов места для радиосигнала с частотой 10 Мгц, т.к. заданная частота находится на нижнем краю рабочего диапазона частот для конкретных условий, что подтверждается рассчитанными, очень низкими значениями уровня поля приемного сигнала, приведенными на нижнем графике.

ВЫВОДЫ

Результаты проведенных исследований показали, что численное моделирование процесса распространения радиоволн с использованием эмпирической корректируемой модели ионосферы позволит увеличить объем информации о состоянии радиоканалов распространения декаметровых радиоволн в районах, не обеспеченных станциями наклонного зондирования.

Полученное соответствие параметров распространения КВ-радиосигналов, рассчитанных по разработанной модели КВ-радиоканала и измеренных экспериментально методом НЗИ, допускает возможность использовать разработанную диагностическую модель КВ-радиоканала для целей прогнозирования в высокоширотных районах, не обеспеченных станциями НЗИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альперт Я.Л.* Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 564 с.
- Ануфриева Т.А., Шапиро Б.С.* Геометрические параметры слоя F2 ионосферы. М.: Наука, 1976. 91 с.
- Баранов В.А., Егоров И.Б., Попов А.В.* К расчету антиподной и кругосветной фокусировки в горизонтально-неоднородном ионосферном волноводе // Диффракционные эффекты декаметровых радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1977. С. 31–42.
- Баранов В.А., Попов А.В.* Метод возмущений для лучей в почти слоистой среде / Распространение декаметровых радиоволн. М.: ИЗМИРАН, 1975. С. 12–20.
- Благовещенский Д.В., Борисова Т.Д.* Коррекция модели радиоканала // Геомагнетизм и аэронавигация. 1989. Т. 29. № 4. С. 696.
- Благовещенская Н.Ф., Баранец А.Н., Борисова Т.Д., Бубнов В.А.* Эффекты отклонения декаметровых радиоволн от дуги большого круга в высоких широтах // Известия ВУЗов. Радиофизика. 1991. Т. 34. № 2. С. 119–122.
- Болдовская И.Г.* Математическое моделирование влияния нестационарных процессов в ионосфере на распространение декаметровых радиоволн // Диффракционные эффекты декаметровых радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1977. С. 151–160.
- Борисова Т.Д.* Программное обеспечение для модернизации параметров КВ-радиоканала, учитывающее эффекты модификации высокоширотной ионосферы при воздействии мощных КВ радиоволн, представляющее модель КВ-радиоканала (CHATRASCA: TRASSA и CHANNEL). Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2014618249, 13 августа 2014. Реестр программ для ЭВМ.
- Борисова Т.Д., Баранец А.Н., Черкашин Ю.Н.* Метод расчета траекторных и энергетических характеристик распространения декаметровых радиоволн на протяженных радиотрассах // Распространение радиоволн в ионосфере. М.: ИЗМИРАН. 1986. С. 12–18.
- Гуревич А.В., Цедилина Е.Е.* Сверхдальнее распространение радиоволн в ионосфере. М.: Наука, 1979. 152 с.
- Дебай П.* Полярные молекулы. М.; Л.: ГНТИ, 1931. 183 с.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 620 с.
- Рытов С.Н.* О переходе от волновой к геометрической оптике // ДАН СССР. 1938. Т. 18. № 2. С. 262–270.
- Чернышев Д.В., Васильева Т.Н.* Прогноз максимальных критических частот: $W = 10, 50, 150, 200$. М.: Наука, 1975. 54 с.

Хазельгров Дж. Лучевая теория и новый метод расчета траекторий. Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн. М.: Наука, 1980. 304 с.

Borisova T.D., Blagoveshchenskaya N. F., Moskvina I.V., Rietveld M.T., Kosch M.J., Thidé B. Doppler shift simulation of scattered HF signals during the Tromsø HF pumping experiment on 16 February, 1996 // *Ann. Geophys.* 2002. Vol. 20. P. 1479–1486.

Rawer K., Ramakrishnan S., Bilitza D. International Reference Ionosphere. International Union of Radio Science, URSI Special Report. Brussel. 1978. 78 p.

T.D. BORISOVA, N.F. BLAGOVESHCHENSKAYA, A.S. KALISHIN

FORECASTING THE CONDITIONS OF THE DECAMETER RADIO WAVE PROPAGATION IN THE ARCTIC REGION

In this paper we present the results of studies the distinctive features of the decameter radio wave propagation based on the results of experimental measurements of radio wave propagation characteristics by the ionospheric oblique sounding (IOS) method and numerical simulation. An algorithm for numerical modeling the trajectory and energetic characteristics of the decameter radio wave propagation in the framework of geometric optics is described. The agreement between the simulated and experimental radio propagation parameters (for example, the values of the maximum observed frequencies) is demonstrated. It is proposed to use the developed diagnostic model of the HF radio channel for the purposes of forecasting in areas not provided with IOS stations.

Keywords: high-latitude ionosphere, oblique ionospheric sounding, propagation of decameter radio waves, radio channel modeling, diagnostics and forecasting the HF radio channel.