

УДК 550.388.2

ЭКСТРАПОЛЯЦИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПРИМЕНИМОЙ ЧАСТОТЫ ПУТЁМ АДАПТАЦИИ ИОНОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ IRI-2007 ПО ДАННЫМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ЕВРОАЗИАТСКОМ РЕГИОНЕ

В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин*

Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского,
г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты на субавроральных и среднеширотной трассах Евроазиатского региона путём адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 по результатам наклонного зондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиопутьях. Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании её адаптированной модели с управляющим параметром в виде эффективного числа солнечных пятен ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты на контрольной трассе и ошибки её экстраполяции на соседние трассы, не оснащённые средствами диагностики, составляют $2\div 8\%$. Данные величины существенно меньше, чем ошибки долгосрочного прогнозирования, которые составляют $9\div 20\%$ [1–3].

ВВЕДЕНИЕ

Ионосфера подвержена значительным пространственно-временным вариациям, которые обусловлены изменчивостью солнечного излучения и многообразием физико-химических процессов в системе магнитосфера–ионосфера–атмосфера. Вариации ионосферных параметров могут неблагоприятно влиять на системы навигации и связи, в которых используются спутниковое позиционирование GPS/ГЛОНАСС, загоризонтные коротковолновые радары, авиационная радиосвязь. В целях смягчения неблагоприятного воздействия ионосферы на военные и гражданские системы используются различные подходы для прогнозирования и корректировки ионосферных моделей, предназначенных для адаптации режимов работы радиоэлектронных систем к условиям распространения радиоволн. Применяются различные модели, в том числе эмпирические и аналитические, глобальные и гибридные.

Для прогнозирования состояния ионосферы используется глобальная ассимиляционная модель Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM) [4, 5]. Она включает измерения электронной концентрации *in situ* со спутников и по данным ионозондов, данные о полном электронном содержании, полученные с помощью систем GPS/ГЛОНАСС, двумерные распределения электронной концентрации в ионосфере полученные на основе томографических измерений, и другие данные. Первичным выходом модели GAIM является непрерывная реконструкция трёхмерного распределения электронной концентрации от 90 км до геосинхронной высоты (35 000 км). Тестирование модели GAIM с точки зрения обеспечения её практического приложения для прогнозирования максимальной применимой частоты проводилось в различных регионах земного шара. Сравнение данных модели GAIM и наблюдений для австралийского региона показало, что она позволяет предсказывать месячные медианные значения максимальной применимой частоты с ошибкой около 10% [6].

Большое распространение получила прогностическая справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere, IRI) [7]. Она базируется на данных мировой сети ионозондов, радаров некогерентного рассеяния и других инструментов и постоянно совершенствуется по мере

* vybornov@nirfi.unn.ru

поступления новой информации. Однако вариации параметров ионосферы день ото дня и их зависимость от гелиогеофизических условий могут сводить на нет эффективность такого прогнозирования.

Для прогнозирования на короткие интервалы времени (день, час или несколько минут) требуется мониторинг ионосферных параметров с такими же временными интервалами. Такой прогноз называется краткосрочным. При этом для корректировки ионосферных параметров и повышения точности предсказаний используют зондовые измерения в реальном масштабе времени, основанные на данных вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования ионосферы, а также сигналы навигационных систем GPS и ГЛОНАСС [8–12]. Наличие сети станций позволяет оперативно получать сведения о состоянии ионосферы в контрольных точках и экстраполировать их на близлежащий регион, где отсутствуют средства зондирования ионосферного канала.

Следует отметить, что по сравнению с другими методами диагностики ионосферы, метод наклонного зондирования позволяет непосредственно определять ключевые параметры ионосферного коротковолнового радиоканала, включая максимальную наблюдаемую частоту, отношение сигнал/шум, диапазон оптимальных рабочих частот, полосу когерентности, скорость передачи информации, надёжность связи.

Для зондирования ионосферного канала широко применяются маломощные ионозонды с непрерывным излучением сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), обладающие высокой помехозащищённостью [13, 14]. Проблему адаптации радиоэлектронных систем к текущему состоянию ионосферы можно было бы решить при наличии постоянно работающей разветвлённой сети ЛЧМ-ионозондов с доступом к результатам зондирования ионосферного канала в режиме *on-line*. Однако отсутствие такой сети делает актуальной задачу пространственно-временного прогнозирования ключевого параметра ионосферного канала — максимальной применимой частоты, а также её экстраполяции на трассы, не оснащённые средствами диагностики. Определение значимых временных интервалов корреляционных связей максимальной наблюдаемой частоты особенно важно при длительных (десятки минут, часы) сеансах связи.

Инерционность ионосферных процессов позволяет устанавливать пространственно-временные корреляционные связи параметров коротковолнового канала и использовать их для прогнозирования на короткие интервалы времени (десятки минут), что имеет важное значение для обеспечения устойчивой коротковолновой радиосвязи в периоды быстрой перестройки ионосферы и во время ионосферных возмущений.

Согласно измерениям [15] радиус пространственной корреляции вариаций критической частоты ионосферы по данным сети станций вертикального зондирования в Австралии и Папуа Новая Гвинея оказался примерно равен 1 000 и 1 500 км вдоль линии север—юг и восток—запад соответственно.

В работах [8, 16, 17] экспериментальные данные по максимальной наблюдаемой частоте, получаемые на сети трасс наклонного зондирования, используются для определения эффективного числа солнечных пятен или потока солнечного излучения на длине волны $\lambda = 10,7$ см. При этом последний находится из условия, чтобы прогнозируемая модель обеспечивала измеряемую максимальную наблюдаемую частоту. Для однокачковых трасс поток связывается с состоянием ионосферы в средней точке трассы наклонного зондирования, которая принимается за ионосферную контрольную точку. Для сети трасс наклонного зондирования получается некоторое распределение контрольных точек. В случае, если другие контрольные точки расположены достаточно близко к средней точке прогнозируемой трассы, то её максимальная применимая частота может быть уточнена путём линейной интерполяции экспериментальных данных [17]. Результаты эксперимента [17] свидетельствуют, что процедуру интерполяции данных наклонного зондирования на средних широтах, повышающую точность прогноза, имеет смысл проводить в пределах

области, занимающей примерно 700 км в широтном и 400 км в долготном (меридиональном) направлениях.

В данной статье адаптация глобальной модели ионосферы осуществлялась путём коррекции её управляющего параметра — эффективного числа солнечных пятен W . В случае использования только одной контрольной трассы, оснащённой системой наклонного зондирования, по результатам измерений ионосферная модель адаптируется путём коррекции W до совпадения экспериментальной максимальной наблюдаемой и расчётной максимальной применимой частоты. Адаптированная таким образом ионосферная модель используется для экстраполяции максимальной применимой частоты на соседние трассы, не оснащённые средствами диагностики.

При наличии нескольких трасс (трёх и более), оснащённых средствами наклонного зондирования, адаптация управляющего параметра W осуществляется для каждой контрольной трассы. При таком подходе можно получить аналитическое представление для эффективного числа солнечных пятен, которое описывает поведение W в окрестности средних точек контрольных трасс и используется для расчёта максимальной применимой частоты на рабочих радиопутьях, проходящих вблизи этих трасс.

Для проверки работоспособности методов прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты применительно к субавроральным трассам, проходящим через главный ионосферный провал, который подвержен сильным вариациям, впервые используются подходы, ранее предложенные для среднеширотных трасс в работах [8, 17]. Следует отметить, что область субавроральной ионосферы остаётся малоизученной и исследование распространения радиоволн в этом обширном регионе имеет большое значение для обеспечения надёжной работы радиоэлектронных систем различного назначения на проходящих в нём трассах.

В статье представлены результаты прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты на субавроральных и среднеширотной трассах путём адаптации справочной модели ионосферы IRI-2007 по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы на контрольных и рабочих радиопутьях.

1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ И МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследования пространственно-временных корреляционных связей максимальной наблюдаемой частоты проводились в декабре 2016 и сентябре 2017 года. В первом цикле измерения выполнялись на субавроральных трассах наклонного ЛЧМ-зондирования Соданкюля (Финляндия)—Нижний Новгород, Ловозеро (Мурманская обл.)—Нижний Новгород, Салехард—Нижний Новгород, Диксон—Нижний Новгород и на среднеширотной трассе НИС «Горьковская» (Ленинградская обл.)—Нижний Новгород. Во втором цикле измерения проводились на трассах Соданкюля—Васильсурск (Нижегородская обл.), Ловозеро—Васильсурск, Салехард—Васильсурск, Диксон—Васильсурск и НИС «Горьковская»—Васильсурск. Схемы экспериментов показаны на рис. 1 и 2. В статье приведены данные, полученные 17 декабря 2016 и 3 сентября 2017 года для условий спокойной ионосферы с магнитными индексами $K_p \approx 1$ и $K_p \approx 1 \div 3$ соответственно.

Передатчики в Ловозере, Салехарде, Диксоне и НИС «Горьковская» работали круглосуточно с интервалом зондирования 15 мин; диапазон частот $2 \div 30$ МГц, скорость перестройки частоты 550 кГц/с. Передатчик в Соданкюля излучал в диапазоне частот $2 \div 16$ МГц, скорость перестройки частоты составляла 500 кГц/с, интервал зондирования 5 мин. Приём проводился в Нижнем Новгороде и Васильсурске. На рис. 1 и 2 средние точки контрольных трасс Ловозеро (Мурманская обл.)—Нижний Новгород, Васильсурск; Салехард—Нижний Новгород, Васильсурск и НИС «Горьковская»—Нижний Новгород, Васильсурск соединены между собой; там же отмечены средние точки рабочих трасс Соданкюля—Нижний Новгород, Васильсурск и Диксон—Нижний Нов-

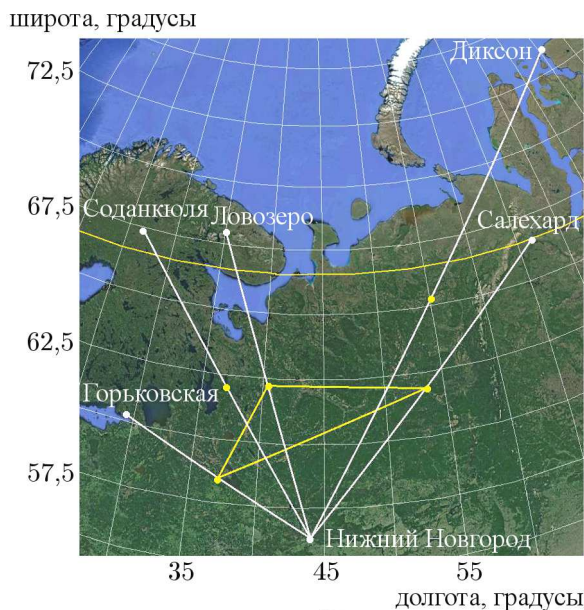


Рис. 1. Схема эксперимента 17.12.2016

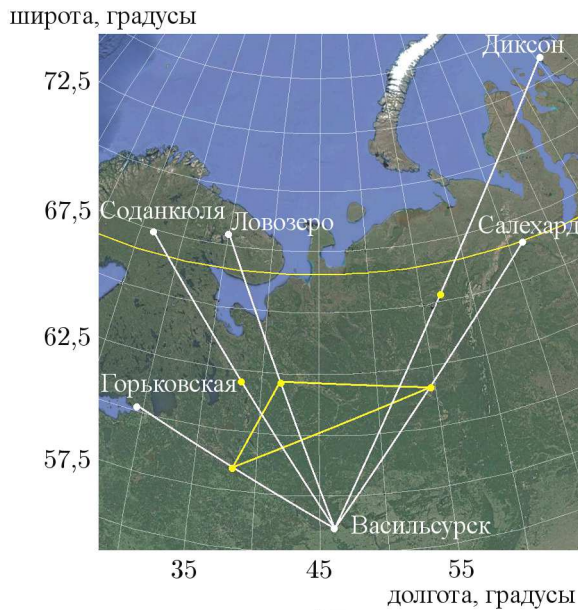


Рис. 2. Схема эксперимента 03.09.2017

Таблица 1. Координаты приёмопередающих пунктов

Приёмопередающие пункты	Географические координаты
Нижний Новгород	56,00° с. ш., 44,00° в. д.
Васильсурск	56,10° с. ш., 46,10° в. д.
Ловозеро	68,00° с. ш., 35,02° в. д.
Салехард	66,52° с. ш., 66,37° в. д.
НИС «Горьковская»	60,27° с. ш., 29,38° в. д.
Саданкюля	67,40° с. ш., 26,60° в. д.
Диксон	73,50° с. ш., 80,70° в. д.

город, Васильсурск. В табл. 1 указаны координаты приёмопередающих пунктов, а в табл. 2 и 3 приведены расстояния между средними точками различных трасс для приёмных пунктов Нижний Новгород и Васильсурск соответственно.

На основе данных, полученных на исследуемых трассах в спокойных ионосферных условиях, была определена временная зависимость максимальной наблюдаемой частоты. По ним вычислялся коэффициент временной корреляции. Затем с помощью уравнения регрессии делался прогноз максимальной наблюдаемой частоты на различные интервалы времени.

Согласно полученным данным коэффициент корреляции максимальной наблюдаемой частоты моды $1F_2$ на интервал прогноза $\tau \approx 0,5 \div 1,0$ ч составлял $\rho \approx 0,7 \div 0,9$. С ростом интервала τ коэффициент корреляции уменьшался. Для разных трасс длина выборки составляла в среднем от 31 до 76 значений.

Коэффициент пространственной корреляции максимальной наблюдаемой частоты моды $1F_2$ на субавроральных и среднеширотных трассах составлял $\rho \approx 0,80 \div 0,95$.

Высокие значения коэффициентов пространственной корреляции максимальной наблюдаемой частоты позволили применить для прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты метод адаптации глобальной модели ионосферы по результатам наклонного зондирования.

Адаптация глобальной модели ионосферы осуществлялась путём коррекции её управляющего параметра — эффективного числа солнечных пятен W — с последующим переходом в модели IRI-2017 к индексам IG12 и Rz12. Суточный ход максимальной применимой частоты рассчитывался с помощью программы компьютерного моделирования распространения радиоволн [18], в которой ионосфера описывалась моделью IRI-2007, а в качестве управляющего параметра использовалось значение W прогностического ряда по данным SWPC [19].

Таблица 2. Расстояния между средними точками трасс для приёмного пункта Нижний Новгород

трассы	D , км
Ловозеро—Нижний Новгород; НИС «Горьковская»—Нижний Новгород	450
Ловозеро—Нижний Новгород; Соданкюля—Нижний Новгород	180
НИС «Горьковская»—Нижний Новгород; Салехард—Нижний Новгород	970
Ловозеро—Нижний Новгород; Диксон—Нижний Новгород	870
Ловозеро—Нижний Новгород; Салехард—Нижний Новгород	680
Диксон—Нижний Новгород; Салехард—Нижний Новгород	473

Таблица 3. Расстояния между средними точками трасс для приёмного пункта Васильсурск

трассы	D , км
Ловозеро—Васильсурск; НИС «Горьковская»—Васильсурск	452
Ловозеро—Васильсурск; Соданкюля—Васильсурск	182
Ловозеро—Васильсурск; Диксон—Васильсурск	871
Ловозеро—Васильсурск; Салехард—Васильсурск	675
Диксон—Васильсурск; Салехард—Васильсурск	472

Коррекция параметра W приводит к вариации распределения электронной концентрации вдоль трассы, т. е. к изменению её максимальной применимой частоты. Путём коррекции W рассчитанное значение максимальной применимой частоты подгоняется к экспериментальной максимальной наблюдаемой частоте с некоторой погрешностью σ .

Далее считалось, что модель с выбранным значением W адекватно описывает распределение электронной концентрации в окрестности исследуемой трассы. Адаптированная таким образом модель используется как для прогнозирования поведения максимальной применимой частоты для данной трассы на некоторый временной интервал, так и для её экстраполяции на соседние трассы, не оснащённые средствами диагностики. Подбор нового значения W проводился в том случае, когда отклонение σ превышало заданное значение σ_{\max} .

1.1. Результаты для 17 декабря 2016 года

В качестве контрольной использовалась трасса Ловозеро—Нижний Новгород. На рис. 3 (крестики) показан временной ход максимальной наблюдаемой частоты моды $1F_2$ на этой трассе для 17.12.2016. Путём подбора числа солнечных пятен W проводилось моделирование ионограмм наклонного зондирования для наилучшего совпадения расчётов и эксперимента. Модельная кривая максимальной применимой частоты, найденная с помощью адаптивной модели ионосферы IRI-2007, приведена на рис. 3 (красная кривая 2). Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчётах изменялось число W .

Значение W в каждом временном интервале указано в поле рисунка. Результаты расчёта максимальной применимой частоты по долгосрочному прогнозу, основанному на данных [19], показаны синей кривой 1. Эффективность прогноза оценивалась по формуле [20]

$$\delta = \frac{[\sum_i (P_i - Q_i)^2]^{1/2}}{(\sum_i Q_i^2)^{1/2}} 100\%, \quad (1)$$

где P_i — прогнозируемое значение максимальной применимой частоты, Q_i — экспериментальное значение максимальной наблюдаемой частоты.

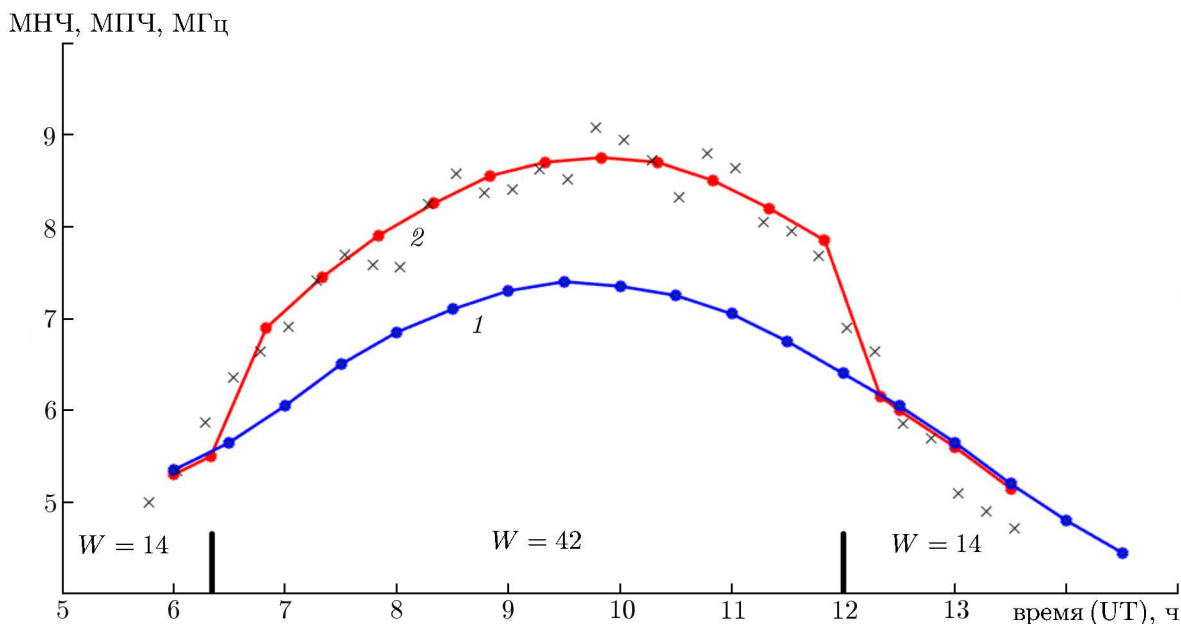


Рис. 3. Трасса Ловозеро—Нижний Новгород, 17.12.2016. Временной ход максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) (крестики) и максимальной применимой частоты (МПЧ) по долгосрочному прогнозу (кривая 1) и по адаптивной модели (кривая 2); W — эффективное число солнечных пятен, $\Delta_1 = 2,1$ МГц, $\delta_1 = 19,1\%$, $\Delta_2 = 0,5$ МГц, $\delta_2 = 4,7\%$

Рассчитывалось также среднее отклонение

$$\Delta = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i - Q_i)^2 \right]^{1/2}. \tag{2}$$

Для разных трасс и дней наблюдений длина выборки N составляла от 15 до 20. Согласно оценкам прогноз по адаптированной модели даёт среднюю ошибку $\delta_2 = 4,7\%$. Для долгосрочного прогноза, когда по данным [19] для условий проведения эксперимента значение $W = 15$, ошибка составляет $\delta_1 = 19,1\%$, т. е. существенно выше, чем для прогноза по адаптированной модели ионосферы. Среднее значение Δ_2 для всего временного ряда по адаптированной модели около 0,5 МГц, а по долгосрочному прогнозу $\Delta_1 \approx 2,1$ МГц. На рис. 4–7 приведены экспериментальные максимальные наблюдаемые и расчётные максимальные применимые частоты для рабочих субавроральных трасс Соданкюля—Нижний Новгород, Салехард—Нижний Новгород, Диксон—Нижний Новгород и среднеширотной трассы НИС «Горьковская»—Нижний Новгород. Для всех этих трасс в расчётах использовалось значение W , полученное на контрольной трассе Ловозеро—Нижний Новгород. В поле всех рисунков приведены значения W , а в подписях к рисункам приведены ошибки прогноза δ и отклонения Δ для долгосрочного прогноза и для прогноза по адаптированной модели. Как видно из рисунков, в утренние и вечерние часы в период перестройки ионосферы моменты времени изменения значения W для различных трасс могут отличаться на небольшую величину 20÷30 мин.

Из рисунков следует, что в условиях спокойной ионосферы при использовании её адаптированной модели ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты на контрольной трассе и ошибки её экстраполяции на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния 180÷870 км

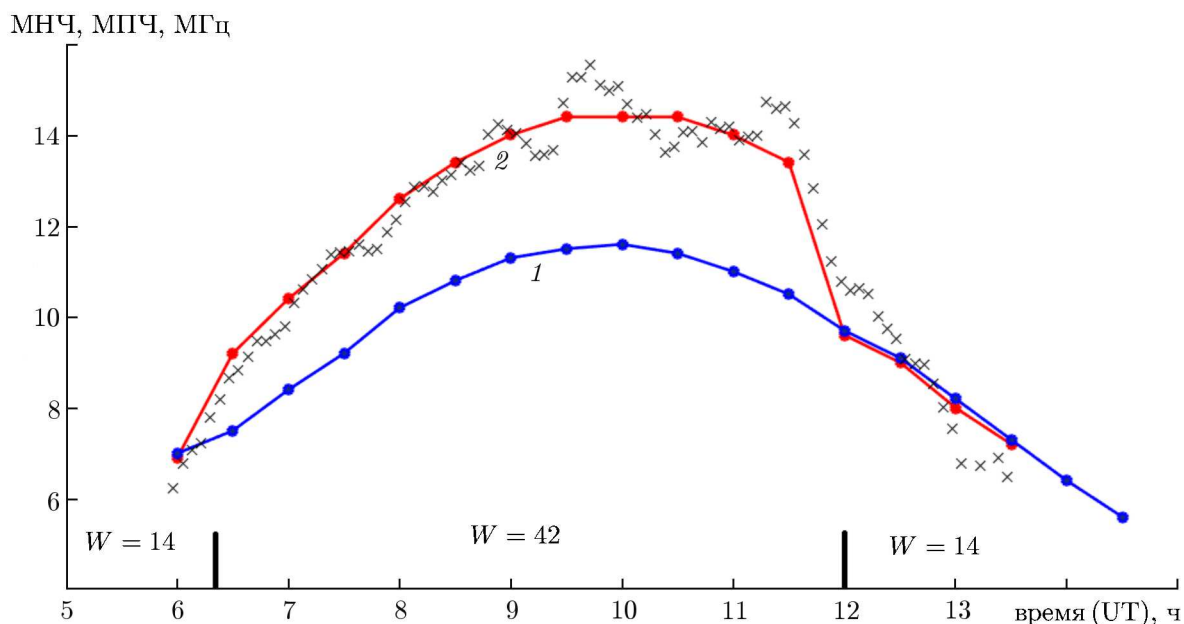


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для трассы Соданкюля–Нижний Новгород; $\Delta_1 = 2,31$ МГц, $\delta_1 = 19,51\%$, $\Delta_2 = 0,56$ МГц, $\delta_2 = 4,7\%$

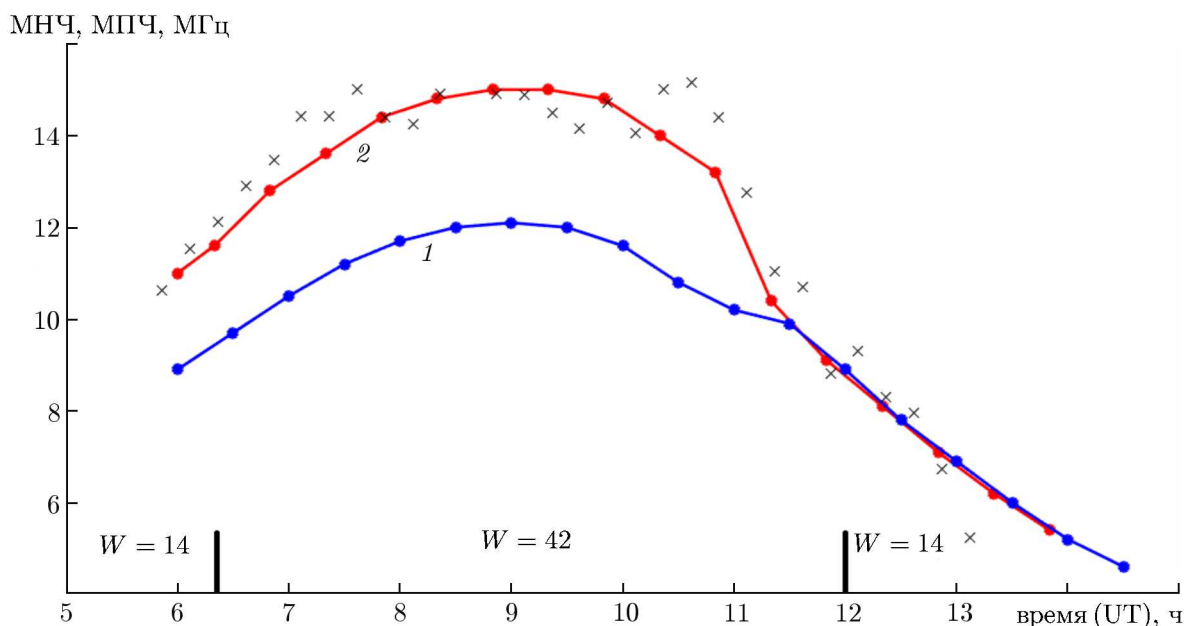


Рис. 5. То же, что на рис. 3, для трассы Салехард–Нижний Новгород; $\Delta_1 = 2,67$ МГц, $\delta_1 = 20,9\%$, $\Delta_2 = 0,76$ МГц, $\delta_2 = 5,9\%$

составляют $4,7 \div 8,6\%$, что существенно меньше, чем ошибки долгосрочного прогнозирования $18 \div 21\%$.

Для экстраполяции максимальной применимой частоты используется также предложенный в работе [17] метод контрольных точек, когда по данным зондирования и адаптации ионосферной модели на трёх контрольных трассах для расчёта максимальной применимой частоты на соседних радиопутьях осуществляется линейная интерполяция числа солнечных пятен.

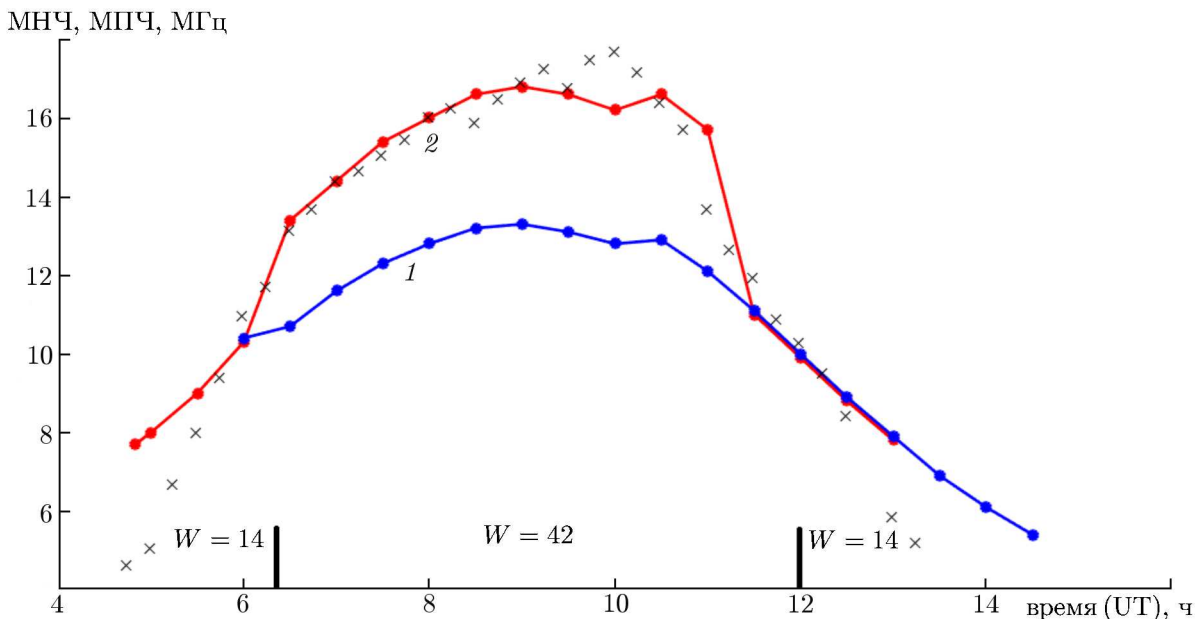


Рис. 6. То же, что на рис. 3, для трассы Диксон—Нижний Новгород; $\Delta_1 = 2,6$ МГц, $\delta_1 = 19,9\%$, $\Delta_2 = 1,15$ МГц, $\delta_2 = 8,6\%$

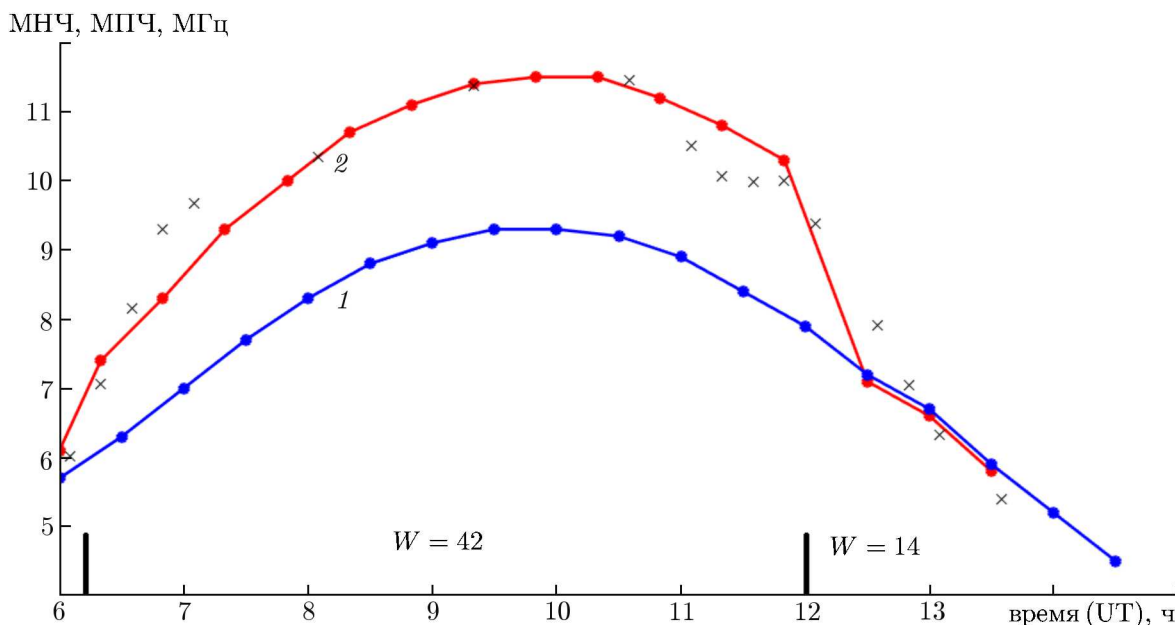


Рис. 7. То же, что на рис. 3, для трассы НИС «Горьковская»—Нижний Новгород; $\Delta_1 = 1,6$ МГц, $\delta_1 = 17,8\%$, $\Delta_2 = 0,5$ МГц, $\delta_2 = 5,5\%$

При этом для всех трёх контрольных трасс по модели ионосферы IRI рассчитываются максимальные применимые частоты и путём подбора числа солнечных пятен W ищется наилучшее согласование с экспериментальными значениями максимальных наблюдаемых частот. В результате моделирования для трасс 1, 2 и 3 получаются значения W_1 , W_2 и W_3 соответственно. В эксперименте используются контрольные трассы НИС «Горьковская»—Нижний Новгород, Ловозеро—Нижний Новгород и Салехард—Нижний Новгород.

Далее в предположении линейной зависимости значений W_k , где $k = 1, 2, 3$, от географических

Таблица 4. Ошибки прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты (МПЧ) по данным для 17.12.2016

время (UT), ч:мин	трасса	МНЧ, МГц	МПЧ, МГц	W	δ , %
07:00	НИС «Горьковская»—Нижний Новгород	9,540	9,40	56,0	1,50
	Ловозеро—Нижний Новгород	9,740	9,80	38,0	0,60
	Салехард—Нижний Новгород	13,980	13,80	49,0	1,30
	Соданкюля—Нижний Новгород	9,900	10,00	36,0	1,00
	Диксон—Нижний Новгород	14,400	14,30	40,0	0,70
09:00	НИС «Горьковская»—Нижний Новгород	11,100	11,00	40,0	0,90
	Ловозеро—Нижний Новгород	12,800	12,80	38,0	0,00
	Салехард—Нижний Новгород	14,890	14,90	40,0	0,10
	Соданкюля—Нижний Новгород	14,080	13,60	38,0	3,40
	Диксон—Нижний Новгород	16,850	16,40	39,0	2,70
12:30	НИС «Горьковская»—Нижний Новгород	8,155	8,00	26,0	1,90
	Ловозеро—Нижний Новгород	8,400	8,30	17,0	1,20
	Салехард—Нижний Новгород	7,870	7,90	16,0	0,40
	Соданкюля—Нижний Новгород	9,330	9,40	18,0	0,75
	Диксон—Нижний Новгород	8,400	8,35	10,9	0,60

координат средних точек трасс (точек отражения радиоволн) в их небольшой окрестности можно записать следующее уравнение

$$W = a + bx + cy, \quad (3)$$

где a, b, c — постоянные, $x \equiv \varphi$, $y \equiv \lambda$ — широта и долгота средней точки трассы наклонного зондирования соответственно.

Затем решается система линейных уравнений

$$W_1 = a + bx_1 + cy_1; \quad W_2 = a + bx_2 + cy_2; \quad W_3 = a + bx_3 + cy_3, \quad (4)$$

где (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) — географические координаты средних точек трёх контрольных трасс наклонного зондирования.

Трассы наклонного зондирования и их средние точки показаны на рис. 1. Путём решения системы (4) определяются постоянные a^* , b^* , c^* для каждого временного интервала T , т. е. находится зависимость числа солнечных пятен W от координат (x, y) , которыми могут быть координаты точки отражения для соседней трассы вблизи контрольных точек (x_1, y_1) , (x_2, y_2) и (x_3, y_3) .

Для апробации метода используются данные о максимальной наблюдаемой частоте на рабочих трассах Соданкюля—Нижний Новгород и Диксон—Нижний Новгород, координаты их средних точек (x_c, y_c) и (x_d, y_d) отмечены на рис. 1. Для этих точек из уравнений $W_c = a^* + b^*x_c + c^*y_c$ и $W_d = a^* + b^*x_d + c^*y_d$ находятся значения W_c и W_d .

Для полученных значений W_c и W_d рассчитываются ионограммы наклонного зондирования на трассах Соданкюля—Нижний Новгород и Диксон—Нижний Новгород и определяются максимальные применимые частоты, которые сопоставляются с экспериментальными. Результаты обработки и расчётов приведены в табл. 4.

Из табл. 4 видно следующее. Если значения числа солнечных пятен W по трём контрольным точкам подобраны таким образом, что ошибки прогнозирования максимальных применимых частот по ним составляют $0,1 \div 1,9\%$, то ошибки экстраполяции этих частот на рабочие трассы

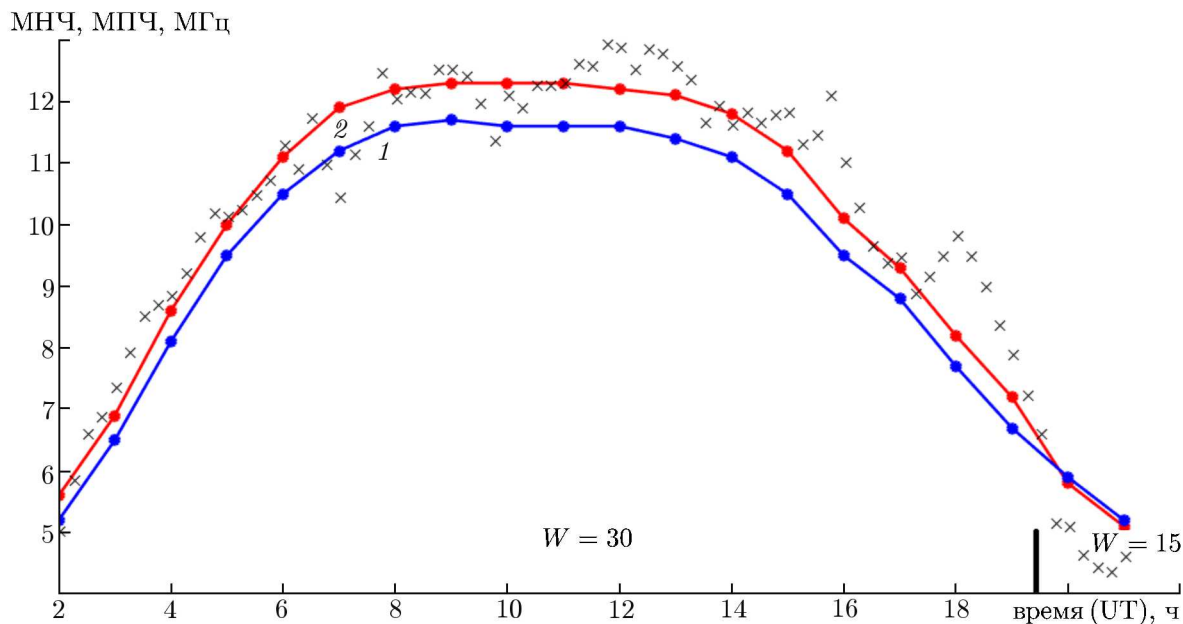


Рис. 8. То же, что на рис. 3, для трассы Ловозеро—Васильсурск, 03.09.2017; $\Delta_1 = 0,98$ МГц, $\delta_1 = 9,5\%$, $\Delta_2 = 0,66$ МГц, $\delta_2 = 6,4\%$

(Соданкюля—Нижний Новгород и Диксон—Нижний Новгород), средние точки которых расположены в пределах $180 \div 470$ км от ближайших средних точек контрольных трасс (см. рис. 1 и табл. 2), составляют $0,6 \div 3,4\%$. На наш взгляд, это вполне приемлемо для обеспечения надёжной работы линий радиосвязи (с адаптацией по частоте), не оснащённых средствами диагностики ионосферного коротковолнового канала.

1.2. Результаты для 3 сентября 2017 года

В качестве контрольной использовалась трасса Ловозеро—Васильсурск. На рис. 8 (крестики) показан временной ход максимальной наблюдаемой частоты моды $1F_2$ на этой трассе для 03.09.2017. Путём подбора числа солнечных пятен W проводилось моделирование ионограмм наклонного зондирования для наилучшего совпадения расчёта и эксперимента. Модельная кривая максимальной применимой частоты, найденная с помощью адаптивной модели ионосферы IRI-2007, приведена на рис. 8 (красная кривая 2). Вертикальными линиями отмечены моменты времени, когда в расчётах число W изменялось.

Согласно оценкам прогноз по адаптированной модели даёт среднюю ошибку $\delta_2 = 6,4\%$. Для долгосрочного прогноза, когда по данным [19] для условий проведения эксперимента $W = 18$, ошибка $\delta_1 = 9,5\%$, т. е. заметно выше, чем для прогноза по адаптированной модели ионосферы. Среднее значение Δ_2 для всего временного ряда по адаптированной модели составляет примерно $0,66$ МГц, а по долгосрочному прогнозу $\Delta_1 \approx 0,98$ МГц. На рис. 9–12 приведены экспериментальные максимальные наблюдаемые и расчётные максимальные применимые частоты для рабочих субавроральных трасс Соданкюля—Васильсурск, Салехард—Васильсурск, Диксон—Васильсурск и среднеширотной трассы НИС «Горьковская»—Васильсурск. Для всех этих трасс в вычислениях использовалось значение W , полученное на контрольной трассе Ловозеро—Васильсурск. В поле всех рисунков приведены значения W , а в подписях к рисункам приведены ошибки прогноза δ и отклонения Δ для долгосрочного прогноза и прогноза по адаптированной модели. Как видно

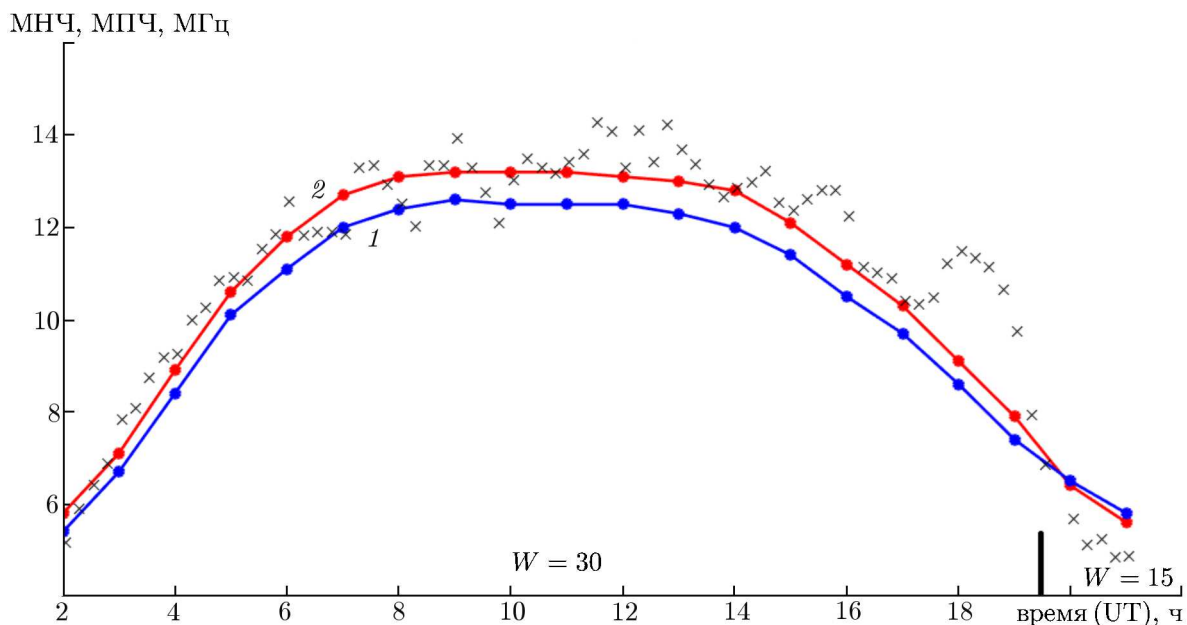


Рис. 9. То же, что на рис. 8, для трассы Соданкюля–Васильсурск; $\Delta_1 = 1,24$ МГц, $\delta_1 = 11,1\%$, $\Delta_2 = 0,88$ МГц, $\delta_2 = 7,8\%$

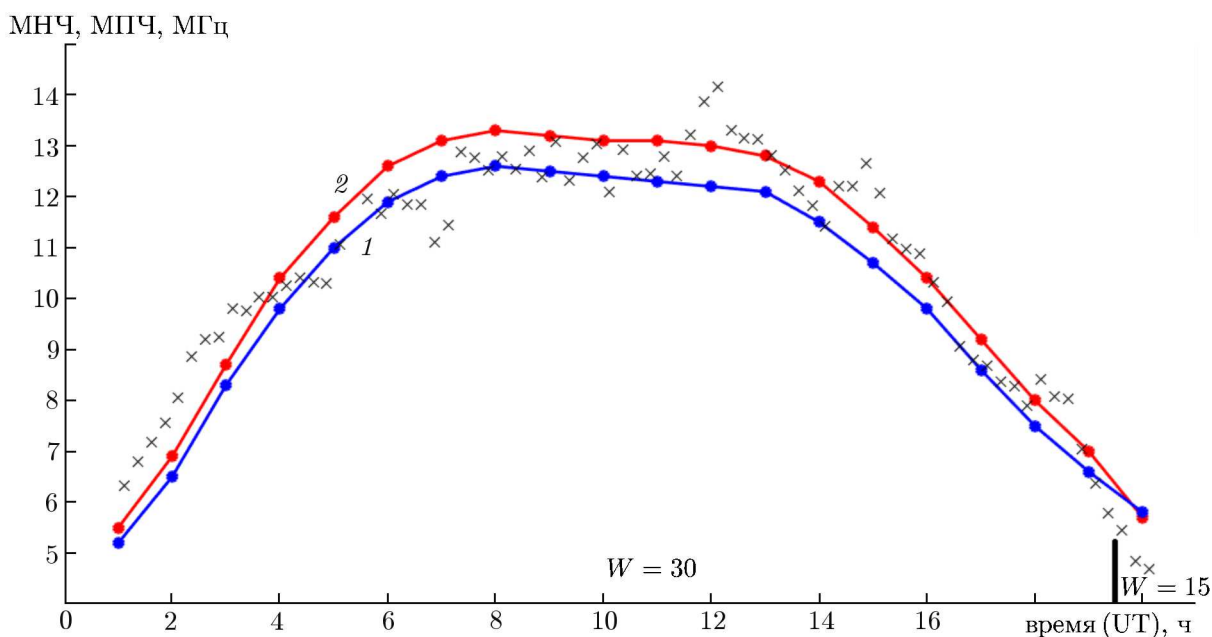


Рис. 10. То же, что на рис. 8, для трассы Салехард–Васильсурск; $\Delta_1 = 0,91$ МГц, $\delta_1 = 8,4\%$, $\Delta_2 = 0,79$ МГц, $\delta_2 = 7,3\%$

из рисунков, в вечерние часы момент изменения значения W для трассы Диксон–Васильсурск отвечает 16:00 UT, а на остальных трассах — 19:30 UT. Это обусловлено долготным эффектом смещения первой трассы в восточном направлении по сравнению с ориентацией других трасс. По сравнению с декабрём, в сентябре для всех трасс временной интервал постоянного значения W , используемого для прогнозирования максимальной применимой частоты в адаптированной модели IRI, заметно больше.

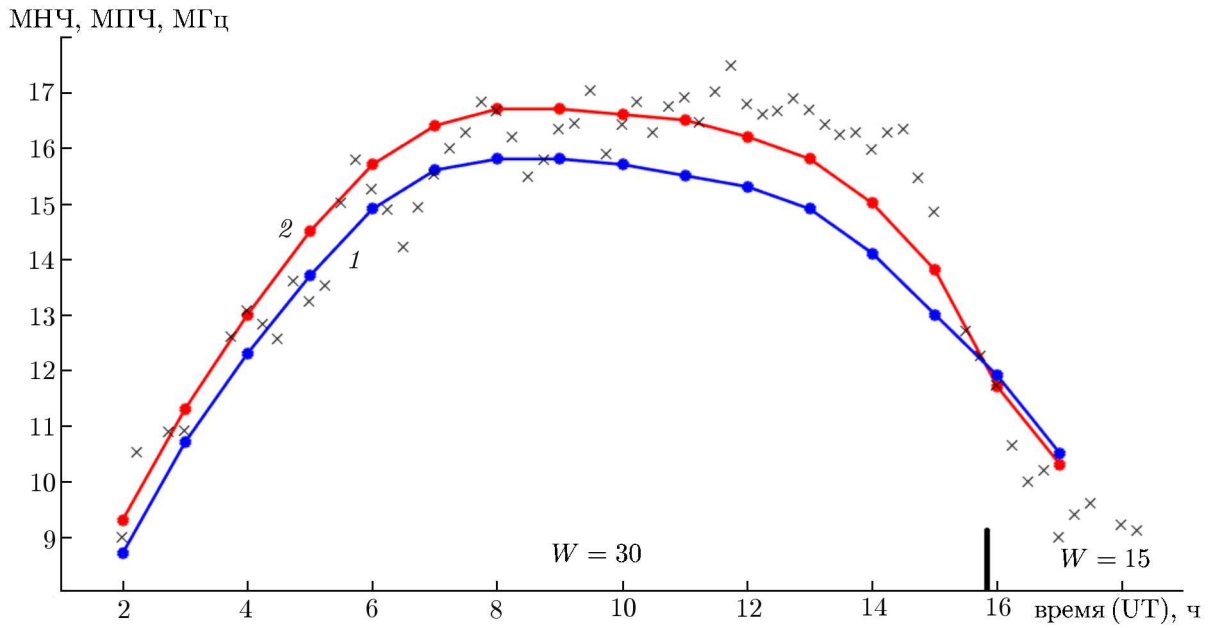


Рис. 11. То же, что на рис. 8, для трассы Диксон–Васильсурск; $\Delta_1 = 1,1$ МГц, $\delta_1 = 7,5\%$, $\Delta_2 = 0,71$ МГц, $\delta_2 = 4,9\%$

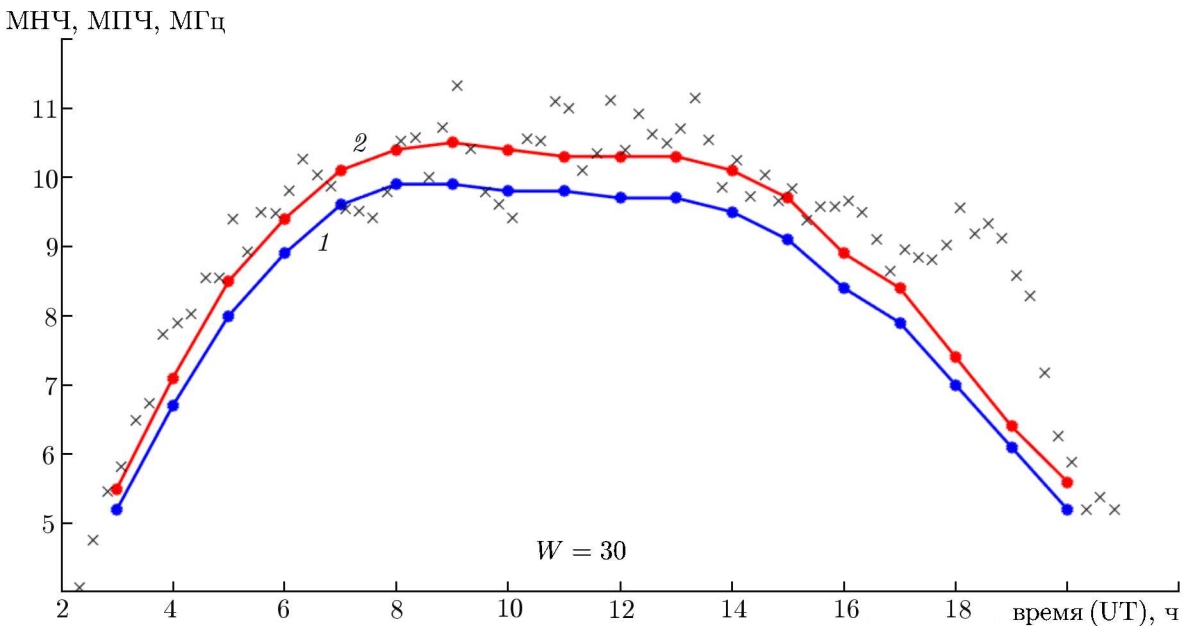


Рис. 12. То же, что на рис. 8, для трассы НИС «Горьковская»–Васильсурск; $\Delta_1 = 1,22$ МГц, $\delta_1 = 12,9\%$, $\Delta_2 = 0,91$ МГц, $\delta_2 = 9,6\%$

Из рис. 9–12 видно следующее. В условиях спокойной ионосферы при использовании её адаптированной модели ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты на контрольной трассе и ошибки её экстраполяции на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния $180 \div 870$ км составляют $4,9 \div 9,6\%$. Это меньше, чем ошибки долгосрочного прогнозирования $7,5 \div 12,9\%$. Следует отметить, что некоторое увеличение ошибок прогнозирования 03.09.2017 с ис-

Таблица 5. Ошибки прогнозирования и экстраполяции максимальной применимой частоты (МПЧ) по данным для 03.09.2017

время UT, ч:мин	трасса	МНЧ, МГц	МПЧ, МГц	W	δ , %
04:00	НИС «Горьковская»—Васильсурск	7,50	7,4	40	1,50
	Ловозеро—Васильсурск	8,75	8,7	32	0,50
	Салехард—Васильсурск	10,10	10,1	24	0,00
	Соданкюля—Васильсурск	9,30	9,1	34	2,10
	Диксон—Васильсурск	12,80	12,1	16	5,40
11:00	НИС «Горьковская»—Васильсурск	10,64	10,7	38	0,60
	Ловозеро—Васильсурск	12,58	12,5	34	0,20
	Салехард—Васильсурск	12,77	12,8	26	0,25
	Соданкюля—Васильсурск	13,58	13,6	36	0,00
	Диксон—Васильсурск	16,62	15,8	22	4,80
16:00	НИС «Горьковская»—Васильсурск	9,30	9,3	40	0,00
	Ловозеро—Васильсурск	10,50	10,5	37	0,00
	Салехард—Васильсурск	10,40	10,4	30	0,00
	Соданкюля—Васильсурск	11,70	11,7	39	0,00
	Диксон—Васильсурск	11,90	12,4	27	4,20

пользованием адаптированной модели для трасс НИС «Горьковская»—Васильсурск, Соданкюля—Васильсурск и Ловозеро—Васильсурск по сравнению с данными для 17.12.2016 обусловлено влиянием вечернего летнего максимума в 17:00÷18:00 UT (см. рис. 8, 9 и 12), формируемого за счёт смены направления меридионального термосферного ветра [21]. Для трассы Диксон—Васильсурск с бóльшим сдвигом к востоку вечерний максимум смещён на более ранние часы 13:00÷15:00 UT (см. рис. 11) и выражен менее ярко, поскольку накладывается на регулярный суточный ход критической частоты.

Результаты экстраполяции максимальной применимой частоты по трём контрольным точкам на основе решения уравнений (3) и (4) приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно следующее. Если значения числа солнечных пятен W по трём контрольным точкам подобраны таким образом, что ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты по ним составляют 0,1÷1,5%, то ошибки её экстраполяции на рабочие трассы (Соданкюля—Васильсурск и Диксон—Васильсурск), средние точки которых расположены в пределах 180÷470 км от ближайших средних точек контрольных трасс (см. рис. 2 и табл. 3), составляют 2,0÷5,4%. На наш взгляд, это вполне приемлемо для обеспечения надёжной работы линий радиосвязи (с адаптацией по частоте), не оснащённых средствами диагностики ионосферного коротковолнового канала.

2. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассматриваются методы прогнозирования и экстраполяции ключевого параметра ионосферного коротковолнового канала — максимальной применимой частоты (МПЧ) — на основе данных наклонного зондирования на сети субавроральных и среднеширотной трасс в обширном Евразийском регионе в интервале широт 56,0÷73,5 с. ш. и долгот 26,6÷80,7 в. д. в условиях низкой солнечной активности. Была проверена работоспособность предложенных в работах [8, 16, 17] методов экстраполяции МПЧ применительно к субавроральным трассам, проходящим

через главный ионосферный провал, подверженный сильным вариациям. Для расчётов МПЧ используется справочная модель ионосферы IRI-2007 с адаптацией к условиям распространения радиоволн путём подбора эффективного числа солнечных пятен на контрольных трассах для наилучшего совпадения экспериментальных и расчётных максимальных частот.

Показано, что в условиях спокойной ионосферы при использовании адаптированной модели ионосферы ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты на контрольной трассе и ошибки её экстраполяции на соседние субавроральные и среднеширотную трассы с удалением средних точек рабочих трасс от средней точки контрольной трассы на расстояния 180÷870 км составляют 4,7÷8,6 % (17.12.2016) и 4,9÷9,6 % (03.09.2017). Данные значения меньше, чем ошибки прогнозирования максимальной применимой частоты по модели GAIM (около 10 %) [6] и заметно меньше, чем ошибки долгосрочного прогнозирования 18÷21 % (17.12.2016) и 7,5÷12,9 % (03.09.2017).

Показано, что ошибки экстраполяции максимальной применимой частоты по трём контрольным точкам для различных временных интервалов (утро, день, вечер) в условиях спокойной геомагнитной обстановки составляют 0,6÷3,4 % (17.12.2016) и 2,0÷5,4 % (03.09.2017), что существенно меньше, чем ошибки долгосрочного прогноза.

Следует отметить, что метод экстраполяции максимальной применимой частоты по трём контрольным точкам обеспечивает несколько большую точность прогноза по сравнению с использованием только одной контрольной радиолинии. Кроме того, такой подход может быть эффективен при наличии возмущения концентрации электронов на трассе распространения, поскольку в определённой мере нейтрализует его влияние на характеристики коротковолновых сигналов за счёт пространственного усреднения. Вместе с тем, использование одной контрольной трассы имеет свои преимущества, поскольку для экстраполяции необходима только одна радиолиния, что немаловажно в условиях ограниченности средств зондирования. Это особенно важно для перспективного арктического направления, где необходимо обеспечить устойчивую радиосвязь на обширной территории в сложных климатических и организационных условиях.

Проведённые исследования показывают, что адаптация ионосферной модели IRI-2007 по данным наклонного зондирования обеспечивает заметный выигрыш в повышении точности прогноза МПЧ по сравнению с долгосрочным прогнозом. Важно отметить, что преимущество метода наклонного зондирования для прогнозирования и экстраполяции по сравнению с другими методами коррекции фоновой ионосферы (вертикальное зондирование, возвратно-наклонное зондирование и GPS/ГЛОНАСС) заключается в возможности непосредственного определения ключевых характеристик ионосферного коротковолнового канала для адаптации радиоэлектронных систем различного назначения к условиям распространения радиоволн.

В целом можно сделать следующий вывод. В условиях спокойной геомагнитной обстановки экстраполяция МПЧ на соседние радиолинии, не оснащённые средствами диагностики ионосферного коротковолнового канала, путём адаптации ионосферной модели к условиям распространения радиоволн по данным наклонного зондирования на контрольной трассе может быть достаточно эффективной (ошибка прогноза 2÷8 %). Это вполне приемлемо для обеспечения устойчивой работы радиоэлектронных систем различного назначения.

В дальнейшем планируется проведение исследований для проверки работоспособности данного метода на трассах наклонного зондирования в условиях повышенной магнитной и солнечной активности. Это особенно актуально для трасс в субавроральной ионосфере, структура которой, включая главный ионосферный провал, испытывает сильные вариации во время магнитно-ионосферной возмущённости.

Авторы благодарят всех сотрудников, обеспечивавших работу ЛЧМ-передатчиков.

Работа выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батаков А. М. // Труды IV Всерос. конф. «Радиолокация и радиосвязь», ИРЭ РАН, 29 ноября–3 декабря 2010 года. С. 790.
2. Анишин М. М. Радио Л. П. // Гелиогеофизические исследования. 2015. № 11. С. 13.
3. Крашенинников И. В., Павлова Н. М., Ситнов Ю. С. // Гелиогеофизические исследования. 2016. Спец. вып. 14. С. 82.
4. Schunk R. W., Scherliess L., Sojka J. J., et al. // Radio Sci. 2004. V. 39, No. 1. Art. no. RS1S02.
5. Титов А. А., Соломенцев Д. В., Хатгатов В. У. // Радиотехника и электроника. 2013. Т. 58, № 6. С. 564.
6. McNamara L. F., Decker D. T., Welsh J. A., Cole D. G. // Radio Sci. 2007. V. 42, No. 3. Art. no. RS3015.
7. Bilitza D., Reinisch B. // Adv. Space Res. 2008. V. 42, No. 4. P. 599.
8. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Shumaev V. V., Uryadov V. P. // Radio Sci. 1997. V. 32, No. 3. P. 983.
9. Арефьев В. И., Кочерова М. К., Талалаев А. Б., Тихонов В. В. // Вестник ТвГУ. Серия: Прикладная математика. 2016. № 1. С. 33.
10. Крашенинников И. В., Егоров И. Б., Павлова Н. М. // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48, № 4. С. 526.
11. Egorov V. A., Teterin K. A. // Phys. Auroral Phenomena. Proc. XXXVIII Annual Seminar, Arpaty, 2–6 March, 2015. P. 127.
12. Смирнов В. М., Смирнова Е. В., Тынянкин С. И. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 32.
13. Goodman J., Ballard J., Sharp E. // Radio Sci. 1997. V. 32, No. 4. P. 1705.
14. Иванов В. А., Куркин В. И., Носов В. Е. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 11. С. 919.
15. McNamara L. F., Wilkinson P. J. // Radio Sci. 2009. V. 44, No. 2. Art. no. RS2016.
16. Reilly M. H., Yamamura E. K. // Proc. IEEE MILCOM Conf. Los Angeles, Calif., 21–24 October, 1984. P. 100.
17. Reilly M. H., Daehler M. // Radio Sci. 1986. V. 21, No. 6. P. 1001.
18. Понятов А. А., Урядов В. П. Компьютерное моделирование ионосферного распространения коротких радиоволн: Препринт НИРФИ № 428. Нижний Новгород, 1996. 20 с.
19. www.swpc.noaa.gov
20. Четыркин Е. М. Статистические методы прогнозирования. М.: Статистика, 1977. 200 с.
21. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 527 с.

Поступила в редакцию 4 октября 2018 г.; принята в печать 30 ноября 2018 г.

EXTRAPOLATION OF THE MAXIMUM USABLE FREQUENCY BY ADAPTING THE IRI-2007 IONOSPHERIC MODEL ACCORDING TO OBLIQUE SOUNDING DATA IN THE EURO-ASIAN REGION

V. P. Uryadov, F. I. Vybornov, and A. V. Pershin

We present the results of forecasting and extrapolating the maximum usable frequency (MUF) on the subauroral and mid-latitude paths of the Euro-Asian region by adapting the IRI-2007 reference

ionospheric model based on the results of the oblique chirped ionosphere sounding on the control and working radio links. It is shown that under the conditions of a quiet ionosphere where the adapted ionospheric model is used, the errors of the MUF prediction on the control path and the error of the MUF extrapolation to the neighboring paths not equipped with diagnostic tools are 2–8%, which is significantly less than the long-term forecast data which amount to 9–20% [1–3].