

А.Г. Ким, Г.В. Котович

Расчет f_0F2 , $hmF2$ в средней точке трассы по экспериментальным данным наклонного зондирования. Сравнение расчетных значений с экспериментальными значениями и с моделью IRI

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Поступила в редакцию 18.08.2006 г.

Описана разработанная и экспериментально проверенная методика оперативного получения параметров $F2$ -слоя ионосферы (критической частоты f_0F2 и высоты максимума $hmF2$) в средней точке трассы наклонного зондирования. Использовались данные регулярных наблюдений ЛЧМ-ионозонда на трассе Норильск – Иркутск и данные поносферной станции вертикального зондирования Подкаменная Тунгуска, которая находится вблизи расчетной средней точки трассы Норильск – Иркутск.

Введение

При диагностике ионосферы необходимо уметь получать информацию о среде в разных точках исследуемого региона, в том числе и в пунктах, где не установлены станции вертикального зондирования (ВЗ). В решении этой задачи важную роль играет изучение связи данных наклонного зондирования (НЗ) и ВЗ.

Вопросам диагностики и прогнозирования параметров КВ-радиоканала по данным НЗ посвящено достаточно много работ [1–3]. Однако экспериментальная проверка методик получения параметров ионосферы по данным НЗ затруднена в связи с отсутствием экспериментальных данных ВЗ вдоль трассы НЗ. В лучшем случае реальная информация об ионосфере во время сеанса НЗ может быть получена в пунктах передачи или приема.

В работах [4–6] на основе метода Смита был предложен простой способ нахождения критической частоты f_0F2 в средней точке трассы НЗ из дистанционно-частотной характеристики (ДЧХ), измеренной на однокачковой трассе.

В данной статье предлагается простой способ расчета не только f_0F2 , но и высоты максимума электронной концентрации $hmF2$ в средней точке трассы НЗ из ДЧХ. Также в работе выполняется экспериментальная проверка расчетных значений f_0F2 и $hmF2$ по данным регулярных наблюдений в 2003–2004 гг.

Расчет высотно-частотных характеристик в средней точке трассы НЗ

Так как сигнал при НЗ отражается от ионосферы вблизи средней точки трассы, то по полученным

данным НЗ возможно определение некоторых параметров ионосферы в этой точке. Методика получения параметров ВЗ по данным НЗ предполагает хорошую точность полученной информации об измеренных радиофизических характеристиках. В экспериментах по НЗ, проводимых в ИСЗФ СО РАН в Иркутске (52° с.ш., 104° в.д.) с использованием ЛЧМ-сигнала [7], измеряется абсолютное время распространения декаметрового сигнала на выбранной трассе (приемный пункт ЛЧМ-ионозонда находится вблизи п. Торы в ~ 95 км юго-западнее Иркутска). Привязка по спутниковой системе GPS позволяет получать достоверные данные по абсолютному времени распространения.

Имея в наличии зависимость абсолютного времени распространения от частоты НЗ (т.е. ДЧХ), можно получить высотно-частотную характеристику (ВЧХ) в средней точке радиотрассы, а следовательно, и f_0F2 в этой точке трассы. Подробно методика нахождения параметров ионосферы по ДЧХ описана в [6], она базируется на методе Смита [8], являющемся для сферически-слоистой ионосферы приближенным аналогом метода «кривых передачи» плоскостной среды. Необходимыми входными данными являются длина трассы НЗ, частота НЗ и соответствующее этой частоте абсолютное время распространения.

При обработке экспериментальных данных НЗ на ДЧХ оператором выделяется трек, относящийся к моду $1F2$ обыкновенной компоненты. Трек сохраняется в виде массива частот и задержек. Затем эти частоты и задержки НЗ пересчитываются в частоты и действующие высоты ВЗ (в результате получается ВЧХ). На рис. 1 показан результат работы алгоритма пересчета экспериментальной ДЧХ (на примере трассы Хабаровск – Торы) в эффективную ВЧХ, которую приближенно можно отнести к средней точке трассы.

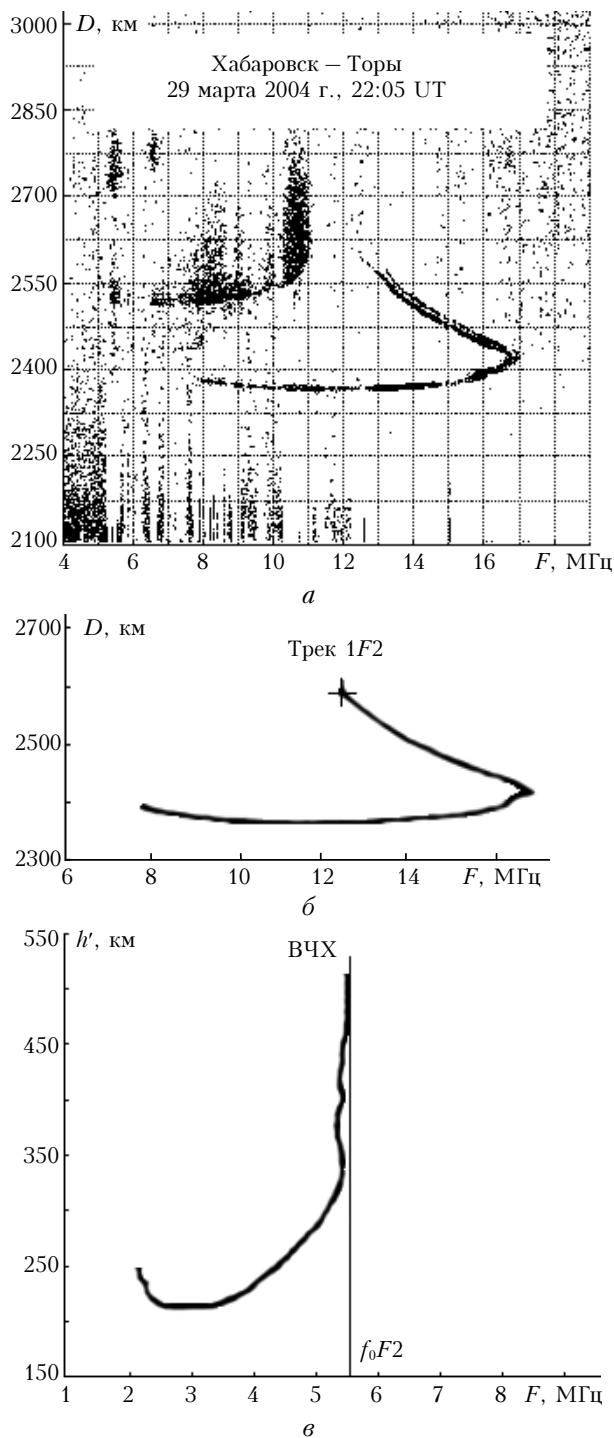


Рис. 1. Пример пересчета ДЧХ (а, б) в ВЧХ (в)

Расчет f_0F2 в средней точке трассы НЗ

Для определения параметра f_0F2 необходимо (и достаточно) фиксировать на ионограмме НЗ частоту и задержку самого верхнего луча («последней» точки, на рис. 1, б отмеченной крестиком), траектория которого перед отражением близка к лучу Педерсена, проходящему высоту максимума ионизации в окрестности средней точки трассы. Эта частота

и задержка «последней» точки экспериментальной ДЧХ на заданной длине трассы операцией, обратной методу Смита, пересчитываются в критическую частоту и действующую высоту отражения от максимума слоя $F2$.

В модифицированном методе «кривых передачи» линейная связь между частотами ВЗ и НЗ определяется множителем ($k \sec\phi$), где k — коэффициент сферичности Земли.

Для трассы Норильск — Торы $k = 1,06983$ (длина трассы $D = 2088$ км). Значения k для других длин трасс приводятся в [9]. Угол падения луча ϕ на слой согласно теореме эквивалентности связан с действующей высотой h' следующей формулой [8]:

$$\phi = \arctg\left(\frac{\sin(D/2R)}{x - \cos(D/2R)}\right), \quad (1)$$

где $x = (R + h')/R$, R — радиус Земли.

Абсолютное время распространения декаметрового сигнала $t_{НЗ}$ при наклонном распространении согласно [8] определяется следующим образом:

$$t_{НЗ} = \frac{2R \sin(\Omega - \phi)}{c \sin \phi}, \quad (2)$$

где $\Omega = \arcsin(x \sin \phi)$; c — скорость света.

Для нахождения искомого значения h' , соответствующего задержке самого верхнего луча односкачкового распространения, выполняется перебор действующих высот с шагом 200 м, начиная от 200 км (для уменьшения времени поиска), и по формулам (1) и (2) находится такое значение группового пути, которое соответствует экспериментальному значению.

Согласно закону секанса частота НЗ f_H связана с частотой ВЗ f_0 соотношением $f_H = f_0 k \sec\phi$. Тогда $f_0F2 = f_H / (k \sec\phi)$, где f_H соответствует помеченной крестиком на рис. 1, б «последней» точке ДЧХ. Этот простой способ пересчета позволяет оперативно находить значение f_0F2 для средней точки трассы НЗ.

Расчет $hmF2$ в средней точке трассы НЗ

Если f_0F2 достаточно легко и оперативно находится по данным НЗ с помощью описанной методики, то для нахождения $hmF2$ требуется более сложный способ.

Для определения $hmF2$ производится восстановление $N(h)$ -профиля в средней точке трассы. Для этого ВЧХ, полученная в результате пересчета ДЧХ, реконструируется в $N(h)$ -профиль по программе Т.Л. Гуляевой ITERAN [10].

Отсутствие информации на ДЧХ обо всех ионосферных слоях затрудняет расчет полного профиля по ВЧХ. Если для расчета f_0F2 достаточно иметь информацию лишь о верхнем луче мода 1F2, то для расчета полного профиля, характеризующего среднюю точку трассы, необходима полная ДЧХ

(включая слой E). На ДЧХ трассы Норильск—Торы слой E проявляется как мод $2E$.

На рис. 2 приведены ВЧХ (кружки), полученная из ДЧХ за 30 марта 2004 г., и восстановленный из нее $N(h)$ -профиль (пунктирная линия) из ВЧХ по программе ITERAN.

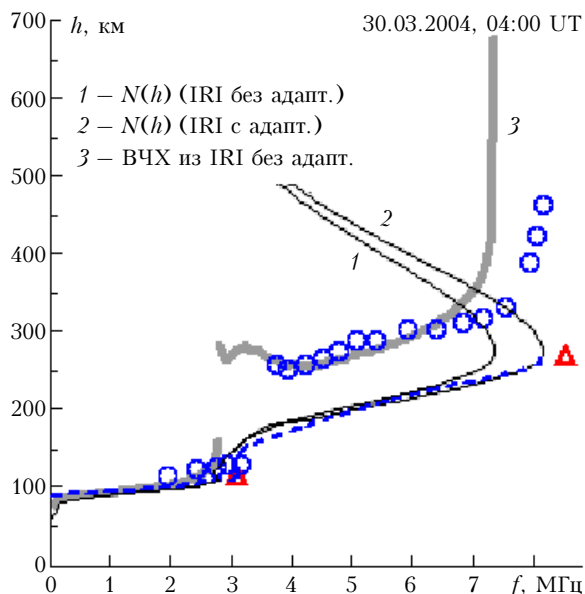


Рис. 2. $N(h)$ -профиль и ВЧХ в средней точке трассы Норильск—Торы

Сплошными линиями показаны профили по модели IRI (с адаптацией по f_0F2 и без нее) и ВЧХ, полученная из одного такого профиля. Треугольниками отмечены значения критических частот f_0F2 , f_0E и высоты максимума ионизации $hmF2$, полученной по упрощенной формуле Дадни [11, 12]:

$$hmF2 = \frac{1490}{M(3000) + 0,253/(f_0F2/f_0E - 1,215)} - 176 \quad (3)$$

из экспериментальных значений f_0F2 , f_0E и $M(3000)F2$ ст. Подкаменная Тунгуска (высота максимума слоя E взята из модели IRI).

Сравнение расчетных f_0F2 с экспериментом и моделью IRI

Попытки экспериментальной проверки расчетов ионосферных параметров по данным ВЗ уже ранее предпринималась [4] в 1989 г. на трассе Магадан—Торы (длина трассы ~3034 км), тогда в средней точке трассы на время проведения эксперимента была специально установлена ионосферная станция ВЗ. Но, к сожалению, ограничение диапазона рабочих частот при НЗ (до 30 МГц) в тот период максимума солнечной активности ($F_{10,7} \approx 217$) не позволило получить ДЧХ вплоть до максимально-применимой частоты (МПЧ).

Максимально-наблюдаемая частота (МНЧ), ограниченная 30 МГц, была существенно ниже расчетной МПЧ. Тем не менее ограниченный набор ДЧХ

в те часы (ночь и переходный период), когда можно было определить МПЧ (как частоту смыкания верхнего и нижнего лучей), позволил сделать выводы об определяющем влиянии параметров ВЗ в средней точке трассы при нахождении МПЧ расчетным путем. Ошибка при сравнении как МПЧ, так и рассчитанных по ДЧХ f_0F2 тогда в среднем составила 5%.

Для новой экспериментальной проверки методики из накопленных данных радиофизических наблюдений нами взяты те данные, которые были получены во время не слишком высокой солнечной активности (чтобы МПЧ не выходила за пределы диапазона частот зондирования). Так как на выбранной трассе должны быть известны экспериментальные данные ВЗ в средней точке, то была использована трасса Норильск—Торы (Торы: $\varphi = 51,8^\circ$ с.ш., $\lambda = 103^\circ$ в.д.; Норильск: $\varphi = 69,2^\circ$ с.ш., $\lambda = 88^\circ$ в.д.), наблюдения на которой были организованы отдельными сериями с 2003 г. Данная трасса расположена в меридиональном направлении (рис. 3) и одной половиной находится в полярной и приполярной зонах (длина трассы ~2088 км).



Рис. 3. Карта эксперимента. Трасса Норильск—Торы и ст. Подкаменная Тунгуска как наиболее близкая из действующих станций ВЗ к расчетной средней точке трассы

Координаты средней точки трассы — $\varphi = 60,7^\circ$ с.ш., $\lambda = 97,5^\circ$ в.д. Ближайшая станция ВЗ расположена в Подкаменной Тунгуске ($\varphi = 61,6^\circ$ с.ш., $\lambda = 90^\circ$ в.д.). К сожалению, полного совпадения координат этого пункта и средней точки трассы нет (расстояние между ними ~416 км).

Часовые значения критических частот $F2$ - и E -слоев, а также коэффициента $M(3000)F2$ ст. Подкаменная Тунгуска в виде табличных данных были любезно предоставлены сотрудниками станции. Было проведено сравнение более 250 часовых значений f_0F2 , полученных на ст. Подкаменная Тунгуска, со значениями f_0F2 , рассчитанными по данным НЗ с помощью вышеупомянутой методики и характеризующими ионосферу в средней точке трассы [13]. На рис. 4 приведен суточный ход f_0F2 в течение одного дня из серии наблюдений каждого сезона в 2003—2004 гг.

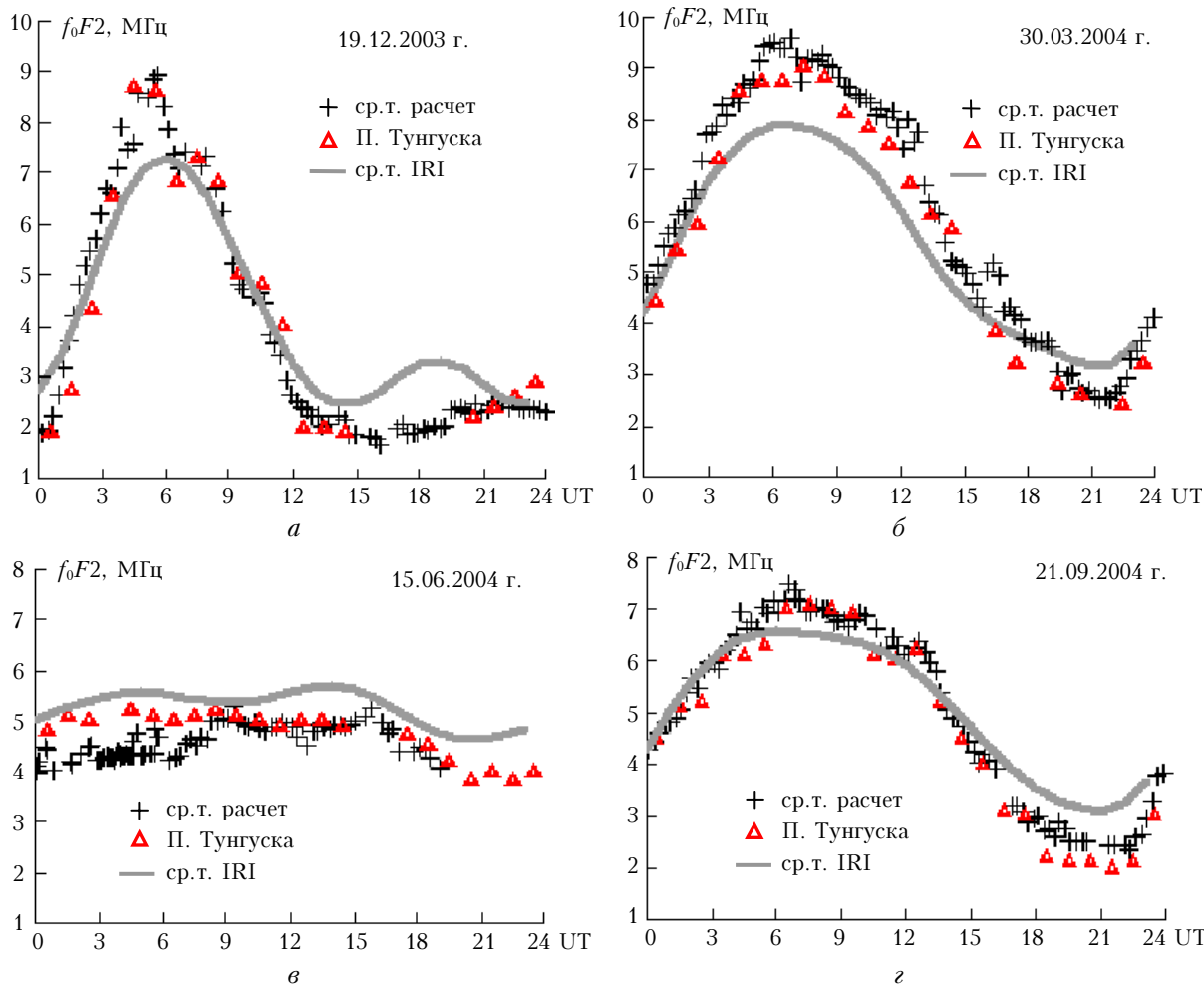


Рис. 4. Суточный ход f_0F2 в средней точке трассы Норильск–Торы и в Подкаменной Тунгуске: среднемесячное значение $F_{10,7} = 111,4$ (а); 111 (б); 100,5 (в); 104,1 (г)

Сравниваемые ряды расчетных и экспериментальных значений f_0F2 были приведены к UT с учетом долготного эффекта. Данные для Подкаменной Тунгуски при переводе в UT подверглись сдвигу на полчаса из-за разницы долгот средней точки трассы и Подкаменной Тунгуски. Из рис. 4 видно, что значения, полученные в результате пересчета, достаточно хорошо согласуются с экспериментальными значениями. Количественное сравнение показывает, что ошибка в среднем составляет ~8% (при максимуме ~25% в отдельные часы). Абсолютная средняя величина отклонения значений f_0F2 в Подкаменной Тунгуске от расчетных значений f_0F2 в средней точке трассы по данным НЗ составила 0,34 МГц, а коэффициент корреляции между значениями f_0F2 равен 0,96. Причем наибольшая погрешность наблюдается в дневное время летом, что может объясняться особенностью метода Смита, в котором не учитываются эффекты, связанные с запаздыванием волны в нижележащих слоях.

Результаты сравнения, приведенные на рис. 4, указывают на качественное и количественное соответствие критических частот, полученных разными способами. Довольно простая методика расчета f_0F2

в средней точке трассы из данных НЗ дает возможность получать дополнительную информацию о среде. Отличия в значениях f_0F2 можно объяснить существующими продольно-поперечными градиентами из-за разницы координат.

Проведение экспериментальных работ требует гораздо больших затрат и ресурсов, нежели численные эксперименты с использованием различного рода моделей ионосферы, наиболее распространенной из которых является модель IRI. Дополнительно на рис. 4 приведен суточный ход критических частот в средней точке трассы, рассчитанных по модели IRI с адаптацией по среднемесячному индексу солнечной активности $F_{10,7}$. Коэффициенты для расчета f_0F2 соответствуют URSI как рекомендованному стандарту для пользователей моделей. Сравнение с моделью IRI показывает отличие медианных модельных значений от ежедневных значений. Несмотря на удовлетворительное согласие модели с экспериментом, все же в условиях отсутствия экспериментальных данных ВЗ предпочтительнее использовать пересчитанные данные экспериментальных наблюдений НЗ, а не модельные (даже после проведения адаптации модели по индексу $F_{10,7}$).

Сравнение расчетных $hmF2$ с экспериментом и моделью IRI

На рис. 5 приведен суточный ход часовых значений $hmF2$, полученных разными способами для тех же дней, что и на рис. 4: по модели IRI, по данным станции Подкаменная Тунгуска и из $N(h)$ -профилей, восстановленных из ВЧХ (по методике Гуляевой), рассчитанных по экспериментальным ДЧХ.

Для 15 июня 2004 г. по данным НЗ можно было рассчитать ВЧХ только в ночные часы (по LT) из-за отсутствия полной ДЧХ днем. Почти на всех ДЧХ этого периода присутствуют только верхние лучи и экранирующий спорадический слой E_s , что позволило рассчитать только критические частоты в средней точке трассы, а высоты максимума получить вышеописанным способом оказалось невозможным. Из рис. 5 видно, что значения $hmF2$ достаточно хорошо согласуются между собой. Поскольку процедура получения высоты максимума $hmF2$ по предложенному алгоритму достаточно громоздка, хотя вполне реализуема, то в оперативных целях

и в тех случаях, когда по данным НЗ невозможно рассчитать $hmF2$, можно использовать значение $hmF2$ из модели IRI.

Для упрощения расчетов $hmF2$ был апробирован быстрый способ определения значения $hmF2$ по формуле (3). Для этого требуется знать параметры только двух точек ДЧХ (точки, соответствующей МПЧ, и «последней» точки). Значение f_0F2 рассчитывается по «последней» точке по описанной методике, значение f_0E берется из модели IRI, а $M(3000)$ рассчитывается по формуле $M(3000) = MUF(3000)/f_0F2$, где $MUF(3000)$ – МПЧ на трассе длиной 3000 км.

Так как длина трассы Норильск – Торы отличается от 3000 км, то по формулам (1) и (2) производится сначала пересчет экспериментальной МПЧ в точку на ВЧХ, а затем по тем же формулам (но для $D = 3000$ км) и из соотношения $f_{H1} = f_0k \sec \theta$ находится частота, которая предполагается равной МПЧ на трассе длиной 3000 км. При расчетах используется предположение, что среда сферически симметрична и высота отражения сигнала от ионосферы на частоте МПЧ для данных длин трасс (2088 и 3000 км) одна и та же.

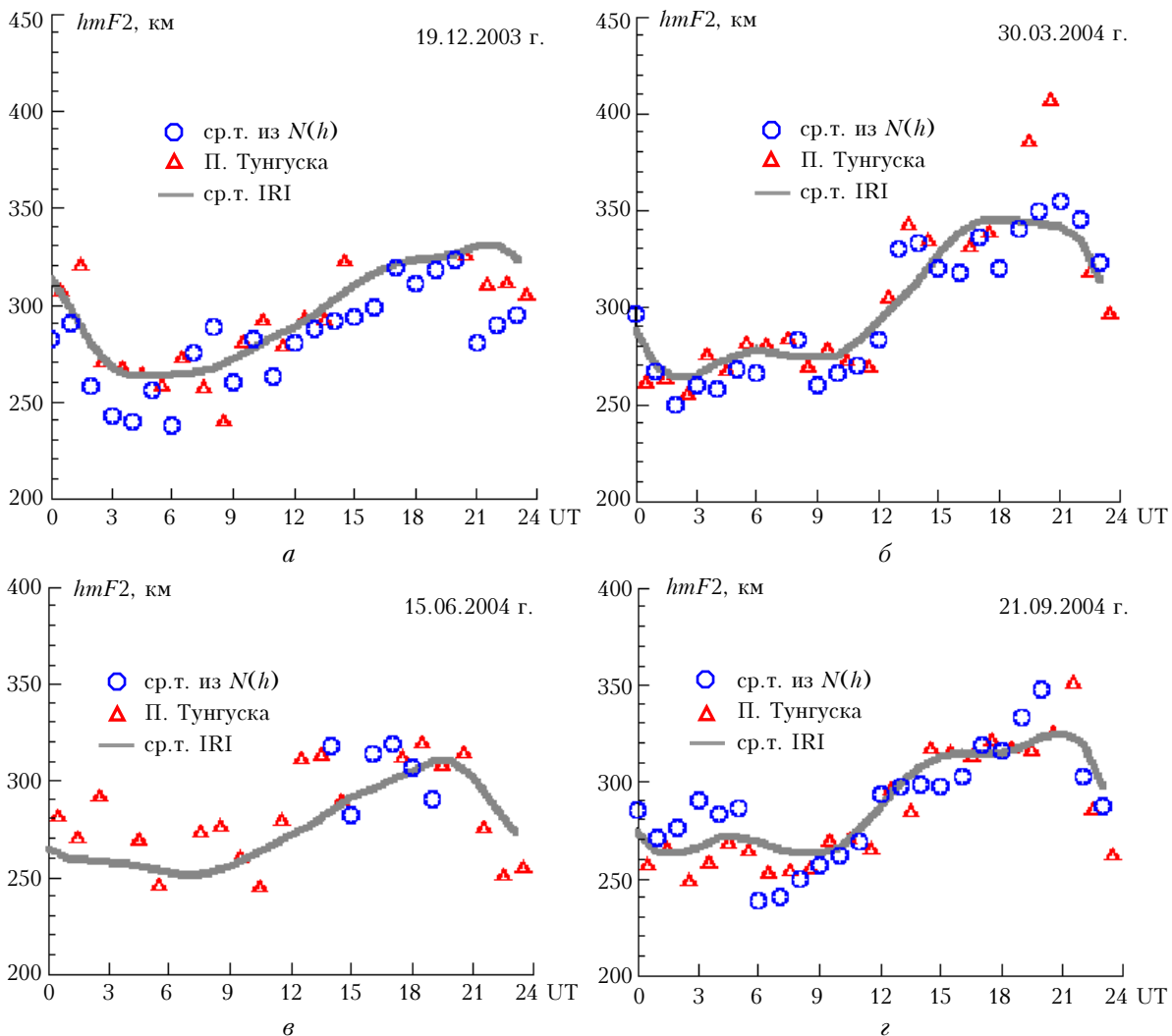


Рис. 5. Суточный ход $hmF2$ в средней точке трассы Норильск – Торы и в Подкаменной Тунгуске

Результаты такого пересчета показаны на рис. 6 крестиками. Видно, что значения $M(3000)$ и $hmF2$ хорошо согласуются с данными ст. Подкаменная Тунгуска и с данными расчетов по $N(h)$ -профилю.

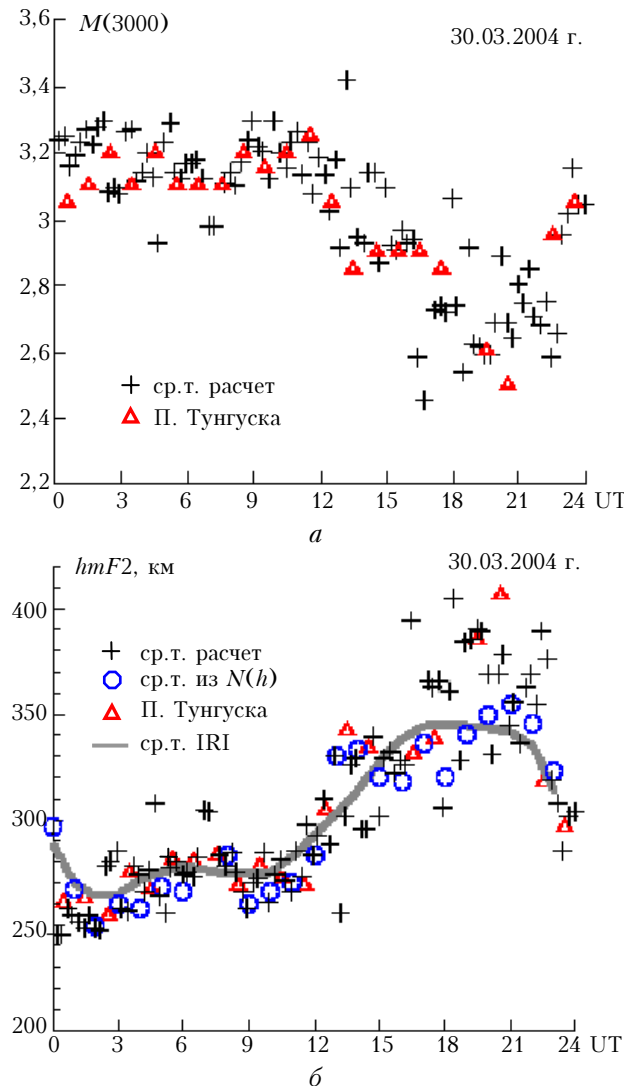


Рис. 6. Суточный ход $M(3000)$ по данным Подкаменной Тунгуски и расчетам из ДЧХ (а); суточный ход $hmF2$ в средней точке трассы Норильск–Торы и в Подкаменной Тунгуске (б)

Ввиду простоты расчетов и необходимости получения всего двух точек (вместо целого трека) этот способ расчета проще и быстрее, чем способ расчета по $N(h)$ -профилю. Однако в случае отсутствия возможности получения параметров «последней» точки или МПЧ использование этого способа расчета $hmF2$ оказывается невозможным.

Адаптация модели IRI по f_0F2 , $hmF2$

Международная справочная модель ионосферы IRI [14] позволяет определять параметры ионосферы в любой точке Земли в любое время. Получаемые усредненные значения ионосферы могут силь-

но отличаться от реальных значений, особенно на территории России. Однако возможность адаптации модели IRI по реальным значениям позволяет в какой-то мере компенсировать этот недостаток. Проведенный анализ возможностей адаптации модели IRI по значениям f_0F2 и $hmF2$ показал, что для получения значений, близких к реальным, достаточно адаптация по одному параметру f_0F2 . Адаптация IRI по двум параметрам – f_0F2 и $hmF2$ – не дает значительного улучшения в расчете $N(h)$ -профиля, так как изменения высоты $hmF2$ малы по сравнению с вариациями f_0F2 .

Заключение

В данной статье был предложен и апробирован оперативный способ получения f_0F2 и $hmF2$ в средней точке трассы НЗ с применением модифицированного метода Смита.

Экспериментальная проверка методики получения f_0F2 и $hmF2$ в средней точке трассы НЗ по данным наблюдений в 2003–2004 гг. на трассе Норильск–Торы и на ионосферной станции ВЗ Подкаменная Тунгуска (вблизи средней точки трассы) показала, что абсолютная средняя величина отклонения значений f_0F2 в Подкаменной Тунгуске от расчетных значений f_0F2 в средней точке трассы по данным НЗ составила 0,34 МГц. Среднее относительное отклонение ~8%, а коэффициент корреляции составил 0,96.

Предложенный простой способ нахождения f_0F2 и $hmF2$ в средней точке трассы по ДЧХ позволяет оперативно и достаточно точно рассчитывать критические частоты и высоты максимума электронной плотности слоя $F2$, характеризующие ионосферу в средней точке трассы. Пересчет данных НЗ в параметры ионосферы в средней точке трассы может быть полезен как возможность получения дополнительной информации о среде в регионах, где отсутствуют ионосферные станции ВЗ. Необходимыми являются наличие достоверных экспериментальных данных НЗ и возможность получения параметров верхнего луча. Это, в свою очередь, может помочь при решении задач оперативной диагностики и прогноза, при создании региональных моделей ионосферы и при адаптации различных моделей к реальным условиям.

Авторы благодарны Н.Ф. Зыряновой за предоставленные материалы наблюдений ст. Подкаменная Тунгуска.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 05-07-90212).

1. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е., Снеговой А.А. Оперативный алгоритм пересчета ионограммы наклонного зондирования ионосферы в эффективную ионограмму вертикального зондирования // Дифракционные эффекты коротких радиоволн. М.: ИЗМИРАН, 1982. С. 117–122.
2. Basler R.P., Scott T.D. Ionospheric structure from oblique-backscatter soundings // Radio Sci. 1973. V. 8. N 5. P. 425–429.
3. Иванов В.А., Рябов Н.В., Урядов В.П., Шумаев В.В. Прогнозирование и экстраполяция параметров КВ-

- радиоканала по данным наклонного зондирования ионосферы // Радиотехника. М., 1997. № 7. С. 28–30.
4. Котович Г.В. Анализ параметров ионосферы f_0F2 , $hmF2$ в средней точке трассы по экспериментальным ионограммам НЗ и ВНЗ: Материалы регион. научн. конф., посвящ. 100-летию изобретения радио // Радиофизика и электроника: проблемы науки и обучения. Иркутск: ИГУ, 1995. С. 40–44.
 5. Ким А.Г., Грозов В.П., Котович Г.В. Применение модифицированного метода «кривых передачи» для расчета критической частоты в средней точке трассы наклонного зондирования по лучу Педерсена // Тр. Байкальской молодежной научной школы по фундаментальной физике. Иркутск, 2004. С. 82–85.
 6. Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я., Грозов В.П., Михайлов Я.С. Определение критической частоты f_0F2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэрон. 2006. (В печати)
 7. Матюшонок С.М., Савченко Т.Н. Многофункциональный приемный комплекс ионосферного зондирования // Тр. Междунар. научн. конф. «Излучение и рассеяние ЭМВ». Таганрог, июнь 16–20, 2003. С. 283–286.
 8. Кияновский М.П. Программа расчетов на ЭВМ по модифицированному методу «кривых передачи» // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн / Под ред. М.П. Кияновского. М.: Наука, 1971. С. 287–298.
 9. Wieder B. Some results of a sweep-frequency propagation experiment over an 1150 km east-west path // J. Geophys. Res. 1955. V. 60. N 4. P. 395–400.
 10. Гуляева Т.Л. Фортран-программа ИТЕРАН для быстрого итеративного $N(h)$ анализа ионограмм. М., 1978. Деп. в ВИНТИ. № 1490–78.
 11. Dudeney J.R. The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-layer from scaled ionospheric characteristics // J. Atmos. and Terr. Phys. 1983. V. 45. N 8/9. P. 629–640.
 12. Dudeney J.R., Kressman R.I. Empirical models of the electron concentration of the ionosphere and their value for the radio communications purposes // Radio Sci. 1986. V. 21. N 3. P. 319–330.
 13. Котович Г.В., Ким А.Г. Экспериментальная проверка методики определения критической частоты f_0F2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования // Солнечно-земная физика. Новосибирск, 2006. Вып. 9. (В печати)
 14. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. 2001. V. 36. N 2. P. 261–275.

A.G. Kim, G.V. Kotovich. Estimation of f_0F2 , $hmF2$ values for path middle point from evidences derived from experimental oblique sounding data. Comparison of calculated values with experimental and IRI values.

The work is devoted to experimental checking of technique for estimation of f_0F2 and $hmF2$ values in path' midpoint through oblique sounding (OS) data. In this work data obtained by chirp-sounder along the Norilsk–Irkutsk path and data obtained at the Podkamennaya Tunguska ionospheric station (which located near estimating path' middle point) were used.