

УДК 550.388

ЛОКАЛЬНАЯ АДАПТАЦИЯ МОДЕЛИ ИОНОСФЕРЫ IRI ПО ДАННЫМ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

© 2013 г. К. А. Тетерин

Институт прикладной геофизики им. акад. Е.К. Федорова Росгидромета, г. Москва

e-mail: electron 77@mail.ru

Поступила в редакцию 13.12.2011 г.

После доработки 27.06.2012 г.

Ввиду распространенности использования эмпирических моделей при осуществлении КВ радиосвязи на дальние расстояния и в задачах обнаружения целей возникла необходимость адаптации этих моделей к реальному состоянию ионосферы, чтобы можно было пользоваться этими моделями в оперативной работе. Предложена адаптация модели IRI путем оптимизации значений глобального ионосферного индекса и числа солнечных пятен, используемых в модели при расчете высотного распределения концентрации электронов в ионосфере, с привлечением данных возвратно-наклонного зондирования. Рассмотрен вопрос о корректности задачи адаптации при некоторых ограничениях. Получена оценка погрешности адаптации.

DOI: 10.7868/S0016794013030188

1. ВВЕДЕНИЕ

В коротковолновой (КВ) радиосвязи и радиолокации широкое применение нашли эмпирические модели ионосферы, которые вместе с моделированием распространения декаметровых радиоволн в ионосфере позволяют рассчитать необходимые характеристики сигналов (дальность скачка по земле, углы прихода, групповой путь). Наиболее широко используется модель ионосферы IRI [Bilitza and Reinisch, 2008]. Среди исходных данных для расчета высотных профилей электронной концентрации в модели IRI используются глобальный ионосферный индекс (*IG12*) и число солнечных пятен (*RZ12*). По данным International Telecommunication Union Radiocommunication Sector (отчет *H.3.2.1.*) точность определения плотности электронной концентрации по модели IRI 2007 на высотах от 200 до 1000 км составляет 15–25% для низких и средних широт (<60°С). Такая точность может оказаться недостаточной для оперативной работы, и требуется адаптация модели к текущему состоянию ионосферы. Известен метод адаптации по оперативным данным вертикального зондирования ионосферы (ВЗ) [Крашенинников и др., 2008]. В данной работе рассматривается метод адаптации по данным возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ) [Михеев и др., 1988]. На основе данных ВНЗ можно получить экспериментальные дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) [Чернов, 1971] в широком азимутальном секторе, что характеризует состояние ионосферы в обширном регионе, и с помощью этих данных можно провести адаптацию модели IRI к текущему состоянию ионосфе-

ры в этом регионе путем решения обратной задачи ВНЗ [Ахмедшин и др., 1991]. Однако решение обратной задачи ВНЗ, т.е. восстановление пространственного профиля электронной концентрации в ионосфере на основе данных ВНЗ, – некорректная задача, дающая множество решений, поэтому требуется применять методы регуляризации. В работе [Ахмедшин и др., 1991] использовалась аппроксимация истинного распределения электронной концентрации в ионосфере аналитической экспоненциально-параболической моделью, параметры которой подлежали определению. Использование данной модельной зависимости лишь частично регуляризовало обратную задачу, поэтому в данной работе предлагается регуляризация, состоящая в ограничении класса решений обратной задачи ВНЗ профилями распределения концентрации электронов, формируемыми моделью IRI. С помощью модели распространения декаметровых радиоволн в ионосфере и модели IRI при заданных значениях параметров *IG12* и *RZX2* рассчитывается модельная ДЧХ. Эти параметры оптимизируются так, чтобы модельная ДЧХ была как можно ближе к экспериментальной в смысле предлагаемого критерия адаптации. При оптимизации исходными являются прогнозные значения. Цель работы состоит в исследовании вопроса о корректности обратной задачи при предложенной регуляризации и критерии адаптации.

2. КРИТЕРИЙ АДАПТАЦИИ

Для адаптации используются экспериментальные и модельные ДЧХ. В качестве критерия адап-

тации ранее применялся критерий минимума среднего модуля невязки экспериментальной и расчетной ДЧХ [Ахмедшин и др., 1991], но этот подход не учитывает ситуации, когда модельная ДЧХ существует в большем или меньшем диапазоне частот из-за отличия модельной ионосферы от истинной. Так как задача решается в отсутствии данных о виде функции потерь и данных об априорных вероятностях того, что ионосфера соответствует модельной с заданными параметрами, то из байесовского критерия вытекает критерий максимального правдоподобия [Левин, 1968], который и предлагается использовать:

$$P(x|A_{opt}) \geq P(x|A) \forall A,$$

где $P(x|A)$ – условная вероятность появления данных отметок x , соответствующих экспериментальной ДЧХ после принятия и обработки сигнала ВНЗ в присутствии помех при том, что истинная ионосфера соответствует модельной по IRI с вектором параметров A ; A – вектор параметров модели IRI, подлежащий определению, $A = \{IG12, RZ12\}$; A_{opt} – оптимизированный вектор параметров. $P(x|A)$ – называется функцией правдоподобия [Левин, 1968]. При вычислении условной вероятности $P(x|A)$ отличие модельной ДЧХ от экспериментальной обусловлено случайными ошибками измерения сигналов экспериментальной и расчета модельной ДЧХ, тогда разности экспериментальных и модельных минимальных времен задержек рассматриваются как случайные величины с нулевым средним.

$$P(x|A) = c_1 \prod_{k=1}^{n1} [p_{c.d(k)} p(\tau_{mod(A,k)} - \tau_{exp(k)}) \times (1 - p_{f.d(k)}) + (1 - p(\tau_{mod(A,k)} - \tau_{exp(k)})) \times (1 - p_{c.d(k)}) p_{f.d(k)}],$$

$$c_1 = C_2 \prod_{l=n1+1}^N (1 - p_{c.d(l)}) (1 - p_{f.d(l)}) \times \prod_{l=N+1}^{N2} (1 - p_{f.d(l)}) p_{f.d(l)} \prod_{l=N2+1}^{N3} (1 - p_{f.d(l)})^2,$$

$$C_2 \prod_{k=1}^{N3} (1 - p_{f.d(k)})^2,$$

где $p_{c.d(k)}$ – условная вероятность правильного обнаружения сигнала в элементе разрешения по дальности; $\tau_{mod(A,k)}$ – минимальное время задержки сигнала, рассчитанное по модели IRI с вектором параметров A ; $\tau_{exp(k)}$ – экспериментальное минимальное время задержки; $p_{f.d(k)}$ – условная вероятность ложного обнаружения сигнала; k – номер частоты зондирования. На частотах с индексами $k = 1 \dots N$ есть модельное распространение, из них

на частотах с индексами $k = n1 + 1 \dots N$, не регистрируются сигналы ВНЗ. На частотах с индексами $k = N + 1 \dots N2$ нет модельного распространения, но фиксируются сигналы ВНЗ, и на частотах с индексами $k = N2 + 1 \dots N3$ не регистрируются сигналы ВНЗ и нет модельного распространения. Отметки, соответствующие экспериментальной ДЧХ, получены с дискретом квантования $\Delta\tau$, тогда $p(t)$ – вероятность попадания отклонения модельной от экспериментальной ДЧХ в интервал $\left[t - \frac{\Delta\tau}{2}, t + \frac{\Delta\tau}{2} \right)$,

$$p(t) = \int_{t - \Delta\tau/2}^{t + \Delta\tau/2} \rho(x) dx, \text{ где } \rho(\tau) \text{ – плотность распределения вероятности ошибок. Пусть она меняется по закону } \rho(\tau) = C \exp\left(-\frac{\tau^2}{b^2}\right) \text{ при } |\tau| < (S + 0.5)\Delta\tau$$

и $\rho(\tau) = 0$ при $|\tau| \geq (S + 0.5)\Delta\tau$, где b – параметр гауссова распределения; S – параметр, характеризующий допустимое расхождение модельных и экспериментальных данных. Коэффициент C_2 является константой и не зависит от модельной ДЧХ, поэтому при определении максимума $P(x|A)$ им пренебрегаем. Если разница $\tau_{mod(A,k)} - \tau_{exp(k)}$ не укладывается в интервал, определяемый выражением $-(S + 0.5)\Delta\tau \leq \tau_{exp(k)} < (S + 0.5)\Delta\tau$, то данная экспериментальная отметка не соответствует данной модели, а частота относится к частотам, на которых не зарегистрирован сигнал ВНЗ. Нормировочный коэффициент C получается из соотношения

$$\int_{-(S+0.5)\Delta\tau}^{(S+0.5)\Delta\tau} \rho(x) dx = 1.$$

3. МЕТОД РАСЧЕТА ДЧХ

Расчет модельных ДЧХ проводится в геометрооптическом приближении [Черный, 1972]. Поперечные к направлению распространения волны градиенты показателя преломления и влияния магнитного поля Земли не учитываются. Закон преломления при таких ограничениях запишется в виде [Альперт, 1963]

$$n_2 r_2 \cos \varphi_2 = n_1 r_1 \cos \varphi_1 + \int_{l(r_1)}^{l(r_2)} n_\theta dl,$$

где n_1 и n_2 – показатели преломления в точках 1 и 2 на луче соответственно; r_1 и r_2 – радиус-векторы, проведенные из центра Земли в точки 1 и 2 соответственно; φ_1 и φ_2 – углы распространения луча относительно направления, перпендикулярного радиус-векторам, проведенным из центра земли в точки 1 и 2 соответственно; l – координата вдоль луча; θ – геоцентрический угол; n_θ – производная показателя преломления по геоцентри-

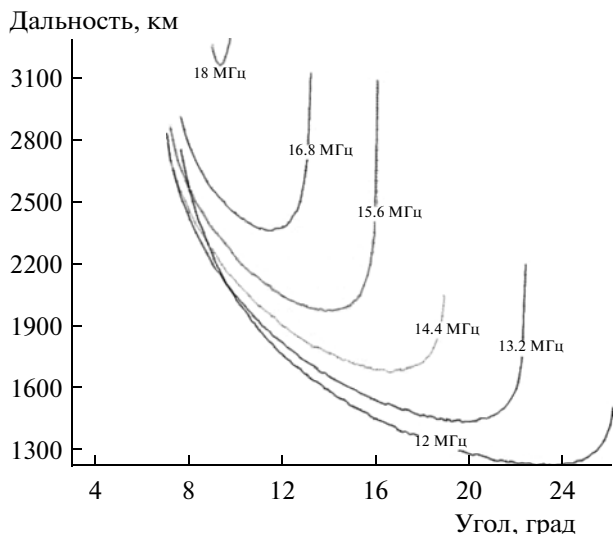


Рис. 1. Зависимость дальности скачка по земле от угла места для ряда частот (7:00 UT).

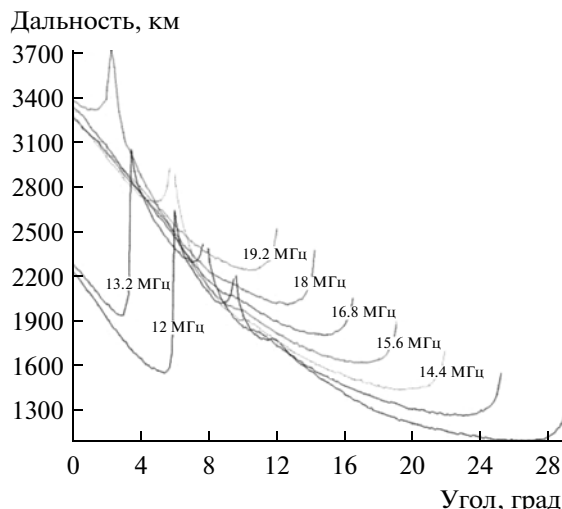


Рис. 2. Зависимость дальности скачка по земле от угла места для ряда частот (11:00 UT).

ческому углу; dl – элемент длины луча. Интеграл берется вдоль луча от точки 1 до точки 2. Заменяя точку с радиус-вектором r_2 на произвольную точку на луче с радиус-вектором r и используя соотношение $\operatorname{tg} \varphi = dr/(rd\theta)$, можно преобразовать это выражение к виду

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r \sqrt{n(\theta, r)^2 r^2 - \left(n_1 r_1 \cos \varphi_1 + \int_{l(r_1)}^{l(r)} n_\theta(l) dl \right)^2}}{n_1 r_1 \cos \varphi_1 + \int_{l(r_1)}^{l(r)} n_\theta(l) dl}.$$

Точка с радиус-вектором r выбирается так, чтобы

$$\int_{l(r_1)}^{l(r)} n_\theta(l) dl \approx (n_\theta(l(r)) + n_\theta(l(n_1))) \Delta l / 2,$$

где $\Delta l = \sqrt{(r - r_1)^2 + \left(\frac{r + r_1}{2}\right)^2 (\theta - \theta_1)^2}$. Окончатель-

но получаем

$$\frac{dr}{d\theta} = \frac{r \sqrt{n(\theta, r)^2 r^2 - (n_1 r_1 \cos \varphi_1 + 0.5(n_\theta(l(r)) + n_\theta(l(n_1)))) \sqrt{(r - r_1)^2 + \left(\frac{r + r_1}{2}\right)^2 (\theta - \theta_1)^2}}}{n_1 r_1 \cos \varphi_1 + 0.5(n_\theta(l(r)) + n_\theta(l(n_1))) \sqrt{(r - r_1)^2 + \left(\frac{r + r_1}{2}\right)^2 (\theta - \theta_1)^2}}.$$

Решение такого уравнения возможно лишь численными методами. Оно решалось методом Рунге-Кутты 4-го порядка с шагом по геоцентрическому углу $\Delta\theta$. Первоначально под обозначениями с индексом l подразумеваются параметры точки входа в ионосферу. Далее делается один шаг, после чего индекс l переходит к только что посчитанной точке, $\cos \varphi = 1/\sqrt{1 + (dr/rd\theta)^2}$ и т.д.

Сравнение результатов расчетов по данной методике для параболической модели профиля электронной концентрации в ионосфере с результатами работы [Керблей и Ковалевская, 1971]

показало совпадение в пределах точности приведенных в ней графических зависимостей.

В качестве примера результаты расчетов по профилю IRI приведены на рисунках 1, 2 и 3 для 19.10.2006 г. 7:00 и 11:00 UT. Моделировалась однокачковая трасса ВНЗ, направленная на запад, в качестве точки локализации станции ВНЗ бралась точка с координатами 55° N , 44° E . Рисунки 1 и 2 представляют собой рассчитанные по данной методике зависимости дальности скачка по земле от угла места для набора частот; каждой кривой соответствует своя частота, указанная на рисунке, время – 7:00 и 11:00 UT соответственно.

По вертикали отложена дальность в км, по горизонтали — угол места в градусах. Рисунок 3 показывает модельные ДЧХ. По вертикали отложена задержка сигналов ВНЗ в мс, по горизонтали — частота в МГц.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Корректность предложенного подхода проверялась путем моделирования. Для начала рассмотрен случай, когда отсутствуют случайные ошибки измерения экспериментальных ДЧХ, и истинная ионосфера соответствует модельной при определенном векторе параметров \mathbf{A} . В качестве экспериментальных данных принималось модельное решение (модельная ДЧХ) при векторе параметров $\mathbf{A}_0 = \{IG12_0, RZ12_0\}$, взятом из прогноза. Пределы изменения параметров модели $IG12$ и $RZ12$ брались с учетом их вариаций за 1958–2009 гг. и составляли $[-14, 173]$ по $IG12$ и $[-15, 270]$ по $RZ12$, что перекрывает диапазон их изменения за указанные годы. Для каждого значения из этих интервалов с шагом 0.2 по $IG12$ и 7.5 по $RZ12$ рассчитывались модельная ДЧХ и функция правдоподобия $P(x|\mathbf{A})$. Моделирование проводилось в условиях высокой ($RZ12 \approx 150$), средней (≈ 70) и низкой (≈ 7) солнечной активности, для середины лета, зимы, весны и осени, для 8:00, 14:00, 20:00 и 24:00 по местному времени. В качестве примера типичный результат представлен на рисунках 4 и 5. На них изображены зависимости функции правдоподобия от вектора параметров модели. Истинное состояние ионосферы соответствует модельной на 19.10.2006 г., 14:00 по местному времени с $\mathbf{A}_0 = \{20.99, 7.15\}$, взятом из прогноза. По оси абсцисс — глобальный ионосферный индекс, разные кривые соответствуют числам солнечных пятен, указанным на рисунке. По оси ординат — значение функции правдоподобия $P(x|\mathbf{A})$.

На рисунке показаны кривые с параметрами модели $RZ12$, кратными 15. Вид кривых при $79.6 \leq IG12 \leq 173$ не показан, так как в этой области они монотонно убывают. На рисунке 5 показан более детальный результат в области максимума $P(x|\mathbf{A})$ с шагом по $RZ12$, равным 7.5.

Видно существование единственного максимума $P(x|\mathbf{A})$, хотя и не ярко выраженного. Полученные в результате адаптации оптимизированные параметры модели $IG12_{\text{opt}}$ и $RZ12_{\text{opt}}$ равны 21 и 7.5 соответственно. Ошибка по всем реализациям по $IG12$ составляет не более 1.5%, а по $RZ12$ — не более 6%. Анализ результатов моделирования показал, что обратная задача при предложенной регуляризации и сделанных ограничениях имеет единственное решение в смысле выбранного критерия адаптации. Для моделирования случая с ошибками измерения экспериментальной ДЧХ и

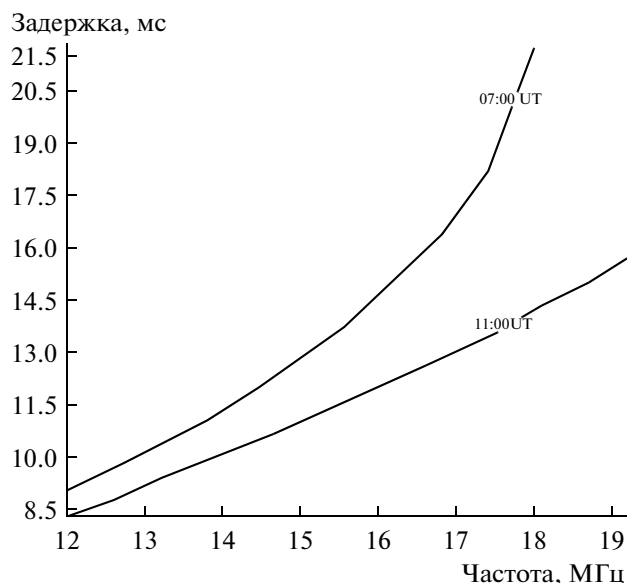


Рис. 3. Модельные дистанционно-частотные характеристики (7:00 и 11:00 UT).

флуктуациями ионосферы в процессе снятия ионограммы ВИЗ, берется модельная ДЧХ с вектором параметров \mathbf{A}_0 , взятом из прогноза, с добавлением случайного отклонения к задержке на каждой частоте. Поскольку программа пишется на C++, то используется генератор случайных чисел $RandG$ с нулевым средним значением и среднеквадратичным отклонением, равным 0.45 мс. На рисунке 6 показан результат.

Видно, что задача имеет единственный максимум $P(x|\mathbf{A})$, который, в отличие от предыдущего случая, выражен достаточно отчетливо. Добавление ошибки сказалось и на точности коррекции модели: $IG12_{\text{opt}} = 21.8$, $RZ12_{\text{opt}} = 30$. Глобальный ионосферный индекс определен достаточно точно, а число солнечных пятен — нет. Ошибки по отношению к интервалам изменения за указанные годы по $IG12$ составляет $\approx 0.5\%$, а по $RZ12 \approx 11\%$. Далее рассмотрен случай со средней солнечной активностью. Ионосфера взята на 19.01.1993 г., 14:00 по местному времени с $\mathbf{A}_0 = \{94.69, 71.12\}$ (рис. 7).

Задача и в этом случае имеет единственный максимум, $IG12_{\text{opt}} = 91.5$, $RZ12_{\text{opt}} = 67.5$. Ошибки по отношению к интервалам изменения за указанные годы по $IG12$ составляет $\approx 2\%$, а по $RZ12 \approx 1.7\%$.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В действительности кривые ДЧХ будут определяться необыкновенной компонентой сигнала. Связь между частотой f в отсутствии магнитного поля и частотой f_x для необыкновенной компоненты,

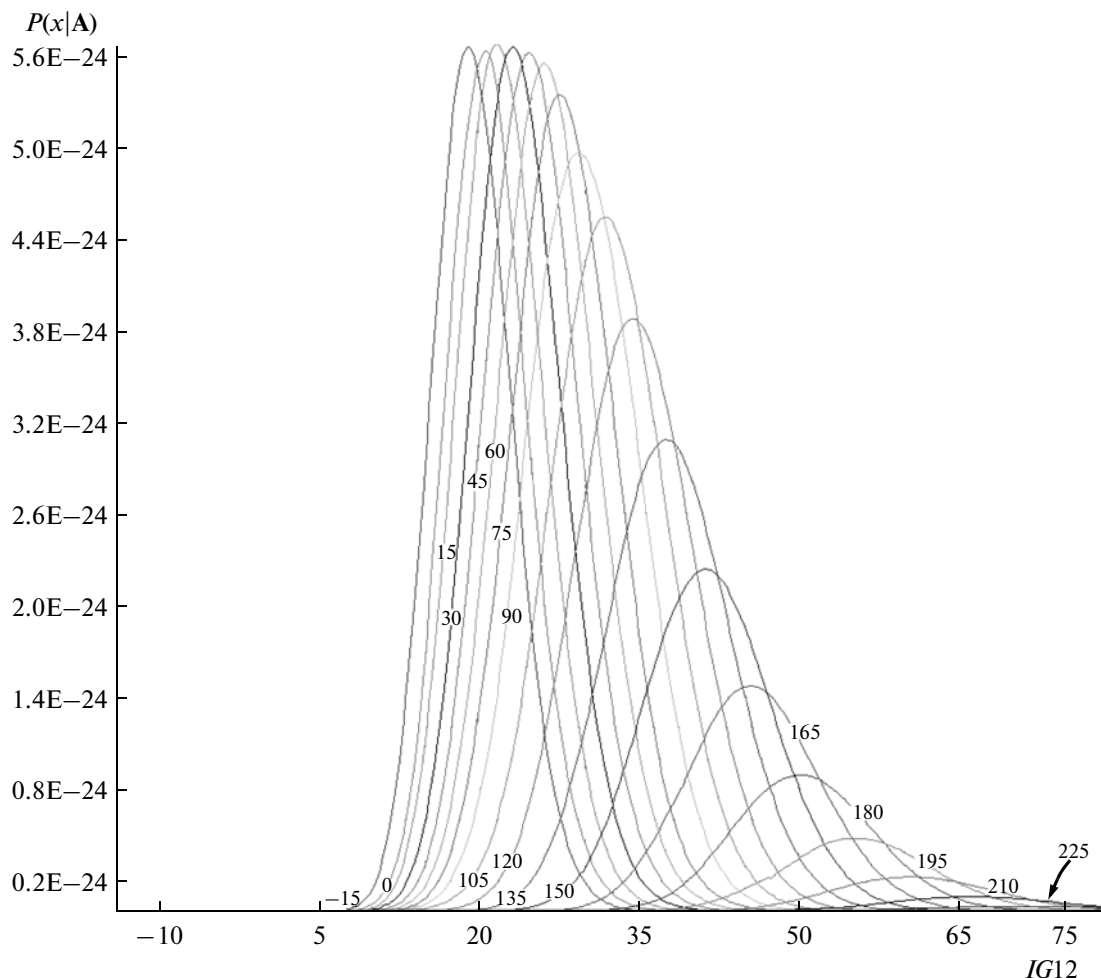


Рис. 4. Зависимость функции правдоподобия от $IG12$ и $RZ12$. Индекс $IG12$ изменялся в интервале $[-14, 79.4]$.

при которых достигается равенство групповых путей вычислена в работе [Крашенинников и др., 1983] и имеет вид $f^2 \approx f_x^2 - f_T^2/2 - \sqrt{f_x^4/4 + f_x^2 f_L^2}$, где $f_T = \frac{e}{2\pi mc} \sqrt{H_r^2 + (H_\theta \sin(\gamma) - H_\phi \cos(\gamma))^2}$; $f_L = \frac{e}{2\pi mc} \times [H_\theta \cos(\gamma) - H_\phi \sin(\gamma)]$; H_r , H_ϕ и H_θ — проекции геомагнитного поля в сферической системе координат на удалении, в равном половине группового пути от точки локализации станции ВНЗ; γ — азимутальный угол; e и m — заряд и масса электрона; c — скорость света. Частоты экспериментальной ДЧХ должны быть пересчитаны в соответствии с этой формулой, после чего ДЧХ можно использовать в алгоритме адаптации.

Поскольку плотность вероятности $p(t)$ имеет в нуле производную, равную нулю, то существует окрестность точки $t = 0$, где $p(t)$ меняется очень незначительно, а вместе с ней и $p(t)$. Если экспериментальная ДЧХ в точности соответствует модельной с вектором параметров \mathbf{A}_0 , то при значе-

ниях \mathbf{A} , лежащих в некоторой окрестности \mathbf{A}_0 , в которой достигается максимум $P(x|\mathbf{A})$, отклонения $\tau_{\text{mod}(\mathbf{A}, k)}$ от $\tau_{\text{exp}(k)}$ для каждого k будут лежать в окрестности нуля, и вероятности $p\{\tau_{\text{mod}(\mathbf{A}, k)} - \tau_{\text{exp}(k)}\}$ будут меняться слабо, а вместе с ними и $P(x|\mathbf{A})$, что видно на рисунках 4 и 5. При добавлении случайных отклонений такого эффекта не будет, и максимум будет достаточно ярко выраженным, как на рисунках 6 и 7.

6. ВЫВОДЫ

1. Предложен критерий адаптации вектора параметров модели ионосферы IRI ($IG12$ и $RZ12$) к реальным измерениям ДЧХ ВНЗ ионосферы, учитывающий не только отклонения модельной ДЧХ от экспериментальной, но и частотный интервал существования ДЧХ, что позволяет сравнивать ДЧХ разной длины при сильном отличии модельной ионосферы от экспериментальной.

2. На основе моделирования показана корректность (единственность решения) обратной

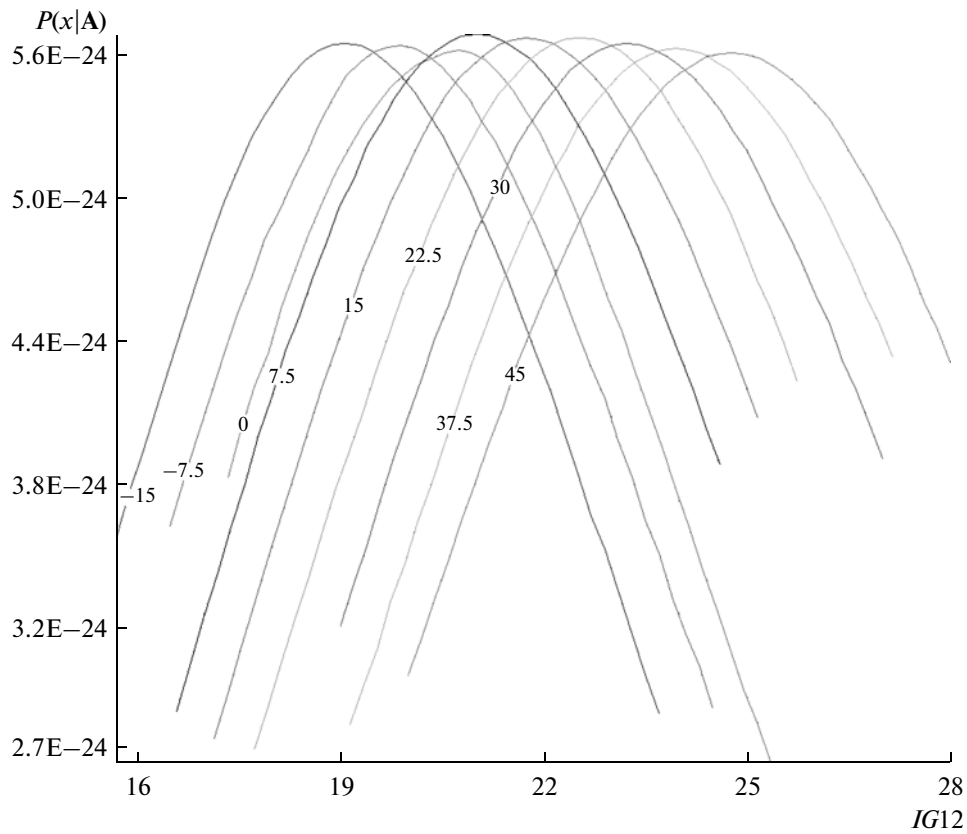


Рис. 5. Зависимость функции правдоподобия от $IG12$ и $RZ12$ в области ее максимума.

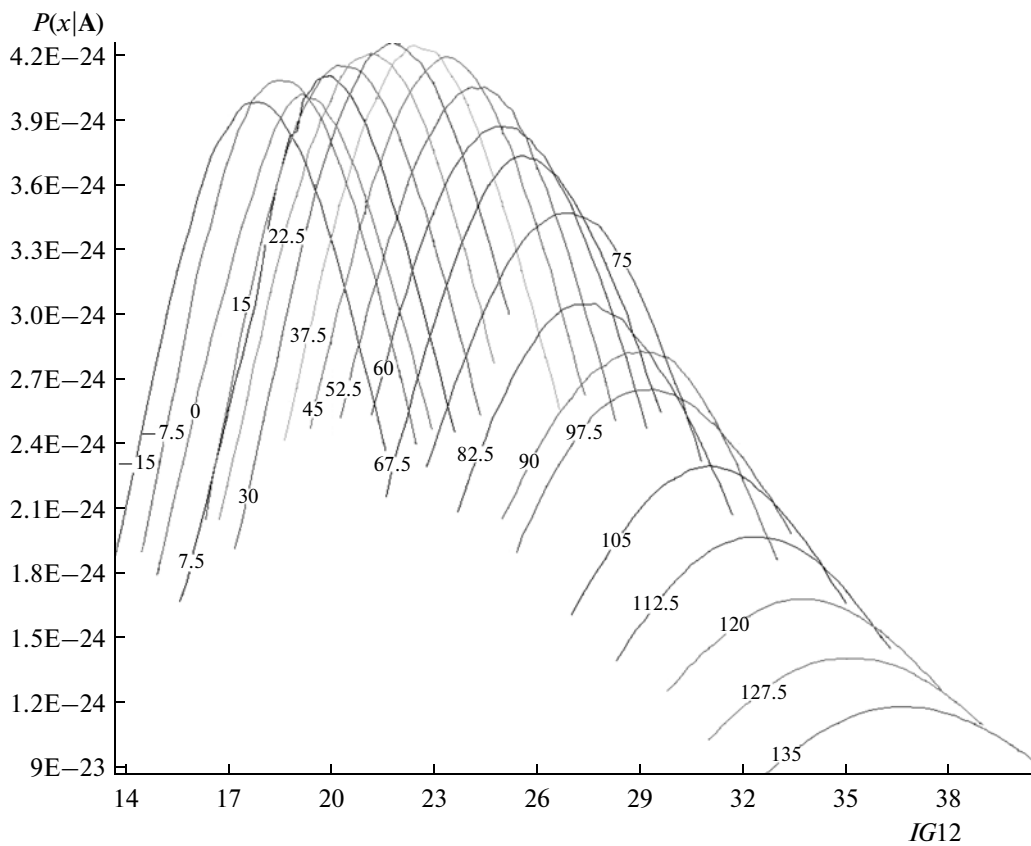


Рис. 6. Зависимость функции правдоподобия от $IG12$ и $RZ12$ при низкой солнечной активности с учетом ошибок измерения.

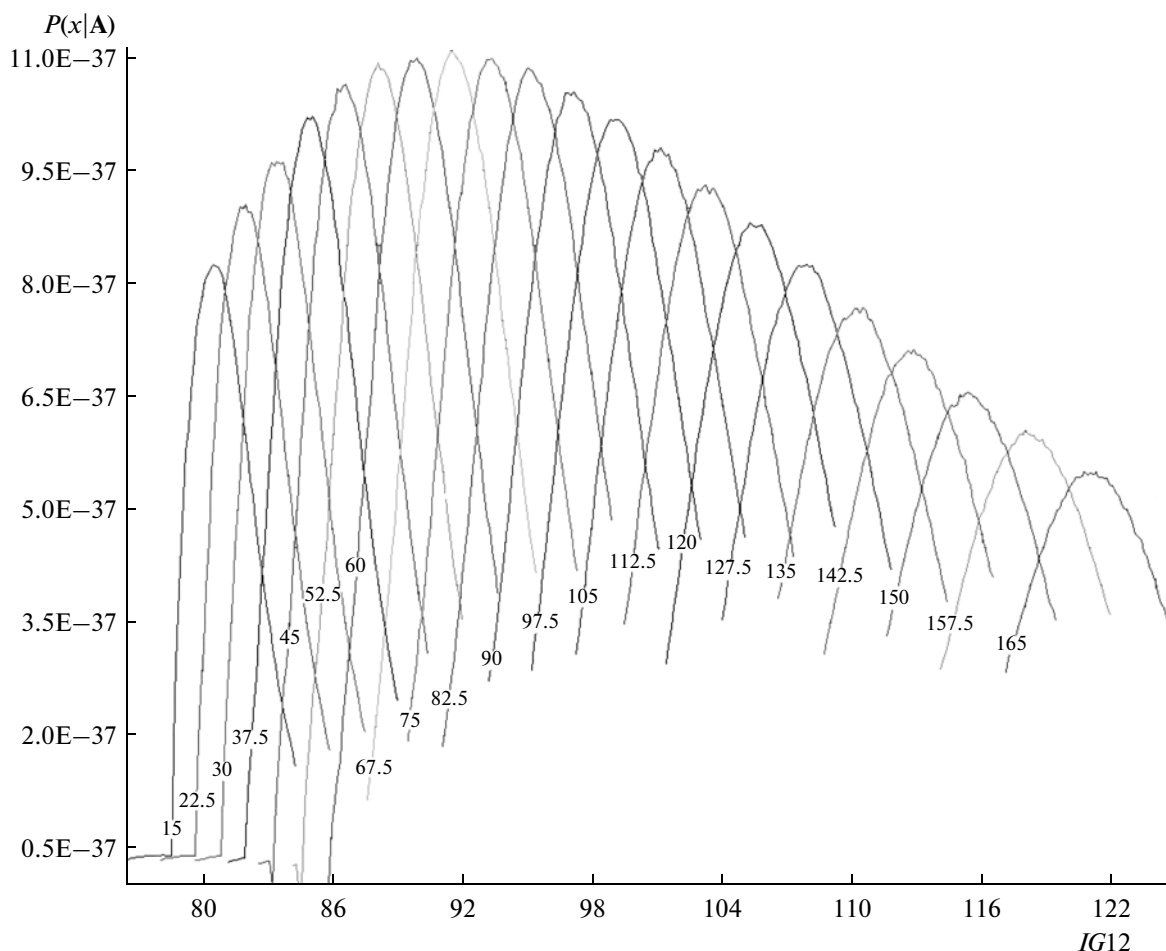


Рис. 7. Зависимость функции правдоподобия от $IG12$ и $RZ12$ при средней солнечной активности с учетом ошибок измерения.

задачи ВНЗ при предложенных регуляризации и критерии адаптации и сделанных ограничениях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Альперт Я.Л. О рефракции и доплеровском смещении частоты радиоволн, излучаемых ИСЗ, в трехмерно неоднородной ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 3. № 4. С. 626–634. 1963.
- Ахмедшин Р.Л., Калинин Ю.К., Платонов Т.Д., Рождественская Л.Л. Обратная задача возвратно-наклонного зондирования для трехслойной ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 31. № 6. С. 1021–1026. 1991.
- Керблай Т.С., Ковалевская Е.М. Расчет скачка, максимальной применимой частоты, углов прихода радиоволны с учетом горизонтальной неоднородности ионосферы. М.: Наука, 116 с. 1971.
- Крашенинников И.В., Егоров И.Б., Павлова Н.М. Эффективность прогнозирования прохождения радиоволн в ионосфере на основе ионосферной модели IRI-2001 // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 48. № 4. С. 526–533. 2008.
- Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Снеговой А.А. Оценка высотного распределения электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэронавигация. Т. 23. № 5. С. 727–732. 1983.
- Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 2. М.: Сов. радио, 504 с. 1968.
- Михеев С.М., Тинин М.В., Фридман О.В. О структуре радиосигнала при возвратно-наклонном зондировании ионосферы // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 31. № 9. С. 1027–1035. 1988.
- Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. М.: СВЯЗЬ, 204 с. 1971.
- Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: Сов. радио, 464 с. 1972.
- Bilitza D., Reinisch B.W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters // Adv. Space Res. V. 42. I. 4. P. 599–609. 2008.