

**ИНВЕРСИЯ ИОНОГРАММ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В ПАРАМЕТРЫ КВАЗИПАРАБОЛИЧЕСКОГО ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ****INVERSION OF BACKSCATTER IONOGRAMS
INTO QUASI-PARABOLIC IONOSPHERIC LAYER PARAMETERS****С.Н. Пономарчук***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru***М.С. Пензин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, penzin@iszf.irk.ru***S.N. Ponomarchuk***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru***M.S. Penzin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, penzin@iszf.irk.ru*

Аннотация. Представлена схема инверсии переднего фронта сигнала возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) в параметры квазипараболического профиля электронной концентрации на основе сравнения экспериментальных и вычисленных минимальных задержек рассеянных сигналов и соответствующих дальностей до границы освещенной зоны. Входными параметрами являются частотные зависимости минимального группового пути распространения сигналов, полученные в результате обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ. Для фиксированной частоты зондирования пара параметров ионосферы — критическая частота и высота максимума слоя F2 — определяется как точка пересечения двух кривых, являющихся решениями задачи минимизации функционалов невязки для минимального группового пути и дальности до границы освещенной зоны. Определение параметров ионосферы по данной схеме инверсии на сетке частот зондирования позволяет построить двумерное распределение электронной концентрации в направлении возвратно-наклонного зондирования.

Ключевые слова: ионосфера, ионограмма, распространение радиоволн, возвратно-наклонное зондирование ионосферы.

Abstract. We present an inversion scheme of the backscatter signal leading edge into parameters of the quasi-parabolic electron density profile, which is based on the comparison of experimental and calculated minimum delays of scattered signals with corresponding distance to the skip zone border. Input parameters are frequency dependences of minimum group path of signal propagation, derived from processing and interpreting backscatter ionograms. For a fixed sounding frequency, the ionospheric parameter pair — the critical frequency and height of the F2-layer maximum — is defined as the intersection point of two curves representing solutions of minimization problems for discrepancy functionals of the minimum group path and the range to the skip zone border. Determining the ionospheric parameters by this inversion scheme on the sounding frequency grid allows us to construct a two-dimensional distribution of electron density in the direction of backscatter sounding.

Keywords: ionosphere, ionogram, radio wave propagation, backscatter ionospheric sounding.

ВВЕДЕНИЕ

Метод возвратно-наклонного зондирования ионосферы (ВНЗ) обладает наибольшими потенциальными возможностями для диагностики условий распространения радиоволн на коротковолновых трассах. Сигнал ВНЗ содержит информацию о состоянии ионосферы на удалении нескольких тысяч километров от места наблюдения в любом заданном направлении. Это существенно дополняет возможности, предоставляемые ионосферными станциями вертикального зондирования (ВЗ), в изучении ионосферы и прогнозировании ее параметров. Инверсия ионограмм ВНЗ связана с решением обратной задачи, когда из данных ВНЗ ионосферы определяются ее количественные параметры. Как правило, в качестве измеряемых характеристик используются задержки

зондирующего сигнала, соответствующие переднему фронту сигнала ВНЗ. Известно, что подобные обратные задачи инверсии относятся к классу некорректно поставленных и для получения устойчивых решений требуется применять методы регуляризации. Одним из них является аппроксимация истинного распределения электронной концентрации в ионосфере модельными функциями, параметры которых подлежат определению [Rao, 1974; Norman, Dyson, 2006; Li et al., 2013]. Для получения единственного решения обратной задачи для заданной частоты зондирования необходимо варьировать минимальный групповой путь с привязкой к дальности до границы освещенной зоны. Такую привязку можно проводить, исходя из геометрии распространения сигнала вдоль траектории [Li et al., 2013].

В работе представлена схема инверсии переднего фронта сигнала ВНЗ в параметры квазипараболического профиля электронной концентрации на основе сравнения экспериментальных и вычисленных минимальных задержек рассеянных сигналов и соответствующих дальностей до границы освещенной зоны. Входными параметрами являются результаты выделения переднего фронта сигнала ВНЗ, полученные после обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ [Penzin et al., 2019]. Передний фронт сигнала ВНЗ, выделяемый по данному методу, фактически является масштабированной частотной зависимостью минимального группового пути распространения сигнала, рассчитанной с использованием прогнозной регулярной модели ионосферы без учета случайных неоднородностей. Соответственно, он лишь близок к реальной передней границе сигнала ВНЗ на ионограмме. Схема инверсии ионограмм ВНЗ реализована для сферически симметричного волновода Земля—ионосфера с профилем электронной концентрации, аппроксимированным двумя квазипараболами с заданными отношениями высот начала слоя и точки сшивки квазипарабол к высоте максимума F2-слоя. Для определения двух неизвестных параметров профиля — критической частоты и высоты максимума слоя F2 — варьируется, помимо минимального группового пути, дальность до границы освещенной зоны, что позволяет определить единственное решение. В отличие от работы [Li et al., 2013], необходимая реальная дальность до границы освещенной зоны определяется из отношения минимального группового пути к дальности до границы освещенной зоны, являющегося адиабатическим инвариантом, с использованием результатов моделирования характеристик сигналов ВНЗ [Penzin et al., 2019]. Для фиксированной частоты зондирования пара параметров ионосферы — критическая частота и высота максимума слоя F2 — определяется как точка пересечения двух кривых, являющихся решениями задачи минимизации функционалов невязки для минимального группового пути и дальности до границы освещенной зоны. Разработанная схема инверсии ионограмм ВНЗ используется для оперативного расчета параметров ионосферы по текущим данным ВНЗ на базе пространственно-распределенного ЛЧМ-иозонда, разработанного в ИСЗФ СО РАН [Подлесный и др., 2013].

МОДЕЛЬ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ

Рассматривается упрощенная постановка обратной задачи. Профиль электронной концентрации $N_e(r)$, рассчитываемый по модели IRI [Bilitza et al., 2017], аппроксимируется двумя квазипараболами [Куркин и др., 1981]:

$$N_e(r) = N_m \begin{cases} d_1 \left(1 - \frac{r_b}{r}\right)^2, & r_b < r < r_0, \\ 1 - d_2 \left(\frac{r_m}{r} - 1\right)^2, & r_0 < r < r_m, \end{cases} \quad (1)$$

$$d_1 = \left[\left(1 - \frac{r_b}{r_0}\right) \left(1 - \frac{r_b}{r_m}\right) \right]^{-1}, \quad d_2 = \left[\left(\frac{r_m}{r_b} - 1\right) \left(\frac{r_m}{r_0} - 1\right) \right]^{-1}.$$

Такая аппроксимация профиля $N_e(r)$ в виде двух квазипарабол описывает высотное распределение электронной концентрации для слоя F2. Четыре параметра, определяющие две квазипараболы, — радиальная координата начала слоя r_b , координата положения максимума профиля r_m , точка сшивки квазипарабол r_0 и электронная концентрация в максимуме слоя N_m — определяются из профиля $N_e(r)$, рассчитанного по модели IRI, методом наименьших квадратов с использованием двумерного аналога метода деления отрезка пополам. Для квазипараболической модели ионосферного слоя расчет характеристик распространения КВ-радиоволн можно проводить на основе аналитических выражений для интегралов [Croft, 1968; Куркин и др., 1981]. В рамках предлагаемой схемы инверсии ионограмм ВНЗ определяются два параметра квазипарабол — критическая частота $f_{cr} = \sqrt{80.6 N_m}$ и высота максимума $h_m = r_m - a$ слоя F2, где a — радиус Земли. Другие два параметра — высота начала слоя $h_b = r_b - a$ и высота точки сшивки квазипарабол $h_0 = r_0 - a$ — связаны с высотой максимума h_m соотношениями $h_b = \frac{k_b - 1}{k_b} h_m$ и $h_0 = \frac{k_0 - 1}{k_0} h_m$. Коэффициенты k_b и k_0 определяются из условия наилучшего приближения квазипараболической аппроксимацией профиля $N_e(r)$, рассчитываемого по модели IRI.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ

Входной радиофизической характеристикой в обратной задаче является массив задержек, соответствующий переднему фронту регистрируемых сигналов на ионограмме ВНЗ. Для выделения переднего фронта сигнала ВНЗ на ионограмме в работах [Пономарчук и др., 2018; Penzin et al., 2019] предложен метод автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВНЗ ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом. Обработка экспериментальных ионограмм проводится на основе фильтрации исходных данных с последующим сжатием их методом клеточного автомата. Методика интерпретации ионограмм базируется на результатах моделирования характеристик сигналов ВНЗ по переднему фронту в рамках волноводного подхода [Ponomarchuk et al., 2009; Penzin et al., 2019] с использованием модели IRI [Bilitza et al., 2017]. Передний фронт сигнала ВНЗ для частоты f соответствует минимальной задержке распространения рассеянного сигнала, или минимальному групповому пути P_m . Поэтому передний фронт на ионограмме ВНЗ можно выделить на основе расчета частотной зависимости минимального группового пути $P_m(f)$ для сигналов НЗ. В рамках волноводного подхода траекторные характеристики сигналов — групповой путь распространения сигнала вдоль траектории, углы выхода из точки излучения и прихода сигнала в точку приема — рассчитываются на основе уравнения стационарности, которое определяет центральный номер n для группы сфазированных нор-

мальных мод. Для приземных излучателя и приемника оно имеет вид

$$\Delta\Phi_n = (\Phi_n - \Phi_{n+1}) = 2\pi l, \quad (2)$$

где l — число отражений траектории сигнала от ионосферы, $\Phi_n = ka \int_0^\theta \gamma_n(\theta_1) d\theta_1$ — фаза нормальной моды [Куркин и др., 1981]. Угол выхода траектории Δ из точки излучения связан с центральным номером n группы сфазированных нормальных мод соотношением $\cos \Delta = \gamma_n$, где γ_n — спектральный параметр нормальной моды [Куркин и др., 1981]. В сферически-симметричном волноводе уравнение стационарности сводится к выражению для дальности скачка вдоль поверхности Земли с использованием связи угла места Δ со спектральным параметром γ_n :

$$D = 2a^2 \cos \Delta \int_a^{r_n} \frac{dr}{r \sqrt{\epsilon r^2 - a^2 \cos^2 \Delta}}. \quad (3)$$

Здесь $\epsilon = 1 - \frac{80.6N_e(r)}{f^2}$ — диэлектрическая проницаемость холодной плазмы [Куркин и др., 1981], r_n — точка отражения траектории в ионосфере. Решение трансцендентного уравнения стационарности (2) относительно угловой дальности θ для заданных значений n_i позволяет построить аналог дальностно-угловой характеристики — зависимость $D(n_i) = a\theta(n_i)$. Вычисляя групповую задержку центральной моды τ_{n_i} и используя $\theta(n_i)$, получим аналог дистанционно-угловой характеристики — зависимость $P(n_i)$, где P — группой путь. На рис. 1 показаны зависимости $D(\Delta)$ (синяя линия) и $P(\Delta)$ (красная линия) односкачкового сигнала для рабочей частоты $f=10$ МГц для сферически-симметричного волновода Земля—ионосфера. Значения центрального номера n_i переведены в углы выхода луча Δ_i с использованием связи номера n_i со спектральным параметром γ_n , определяемой уравнением на спектр нормальных мод [Куркин и др., 1981]. Расчеты $D(\Delta)$ и $P(\Delta)$ были проведены для профиля электронной концентрации $N_e(r)$, аппроксимированного двумя квазипараболами. На рис. 2 показаны профиль плазменной частоты $f_e(h) = \sqrt{80.6N_e(h)}$, рассчитанный по модели IRI (черная линия), и профиль плазменной частоты $f_e(h)$ в виде двух квазипарабол (красная линия) с коэффициентами связи параметров h_b и h_0 с h_m : $k_b=1.5$ и $k_0=8$.

Для заданных значений частоты f и дальности D существуют два решения уравнения стационарности (2) относительно угла выхода траектории из точки излучения, соответствующие нижнему и верхнему лучам [Davies, 1969]. На рис. 1 вертикальными штриховыми линиями отмечены решения для частоты $f=10$ МГц и дальности $D=1100$ км для F2-канала: Δ_1 — нижний луч, Δ_2 — верхний луч. С уменьшением дальности при фиксированной частоте f траектории распространения, соответствующие нижнему и верхнему лучам, сближаются и пересекаются в точке минимума в зависимости $D(\Delta)$. Точка минимума соответствует границе освещенной зоны D_m .

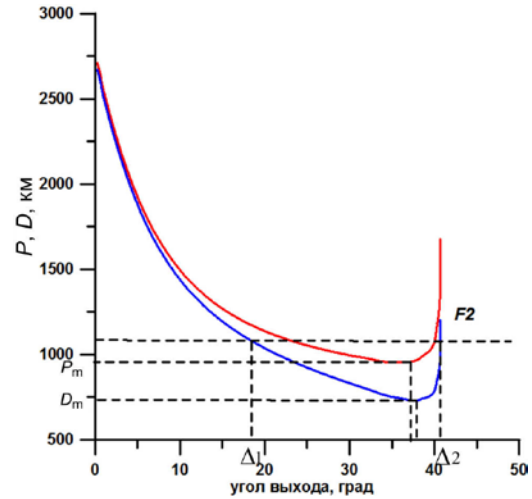


Рис. 1. Зависимость $D(\Delta)$ и $P(\Delta)$

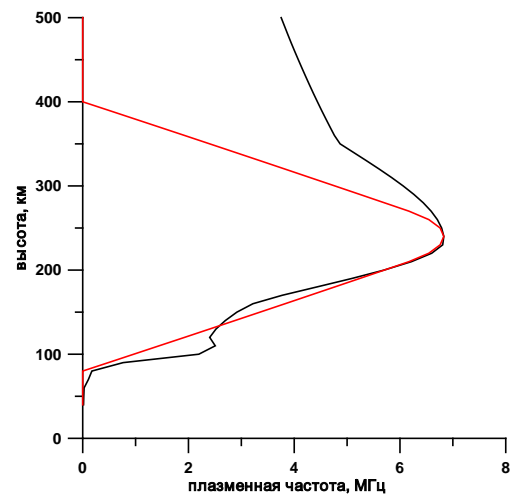


Рис. 2. Профиль плазменной частоты $f_e(h)$

Рабочая частота f для дальности $D_m(f)$ является максимальной применимой частотой f_m (МПЧ) радиосвязи. Минимум в зависимости $P(\Delta)$ определяет минимальный групповой путь P_m [Davies, 1969]. На рис. 1 отмечены D_m и P_m для F2-канала. Видно, что минимумы в зависимостях $P(\Delta)$ и $D(\Delta)$ соответствуют разным углам выхода траектории, поэтому дальность до границы освещенной зоны D_m не совпадает с дальностью, на которой достигается минимум группового пути P_m . С увеличением рабочей частоты эта разница уменьшается.

На рис. 3 показана экспериментальная ионограмма ВНЗ, полученная на ЛЧМ-иозонде ИСЗФ СО РАН [Пономарчук и др., 2017]. Пункт излучения сигналов ВНЗ — Усолье-Сибирское (52.88° N, 103.26° E). Пункт приема — Торы, республика Бурятия (51.70° N, 103.0° E). Азимут излучения — 55° . Время регистрации — 18.11.2005, 03:40 UT. На рис. 4 показаны результаты обработки и моделирования минимального группового пути и границы освещенной зоны, результаты интерпретации ионограммы ВНЗ. Синие точки — выделенные в результате вторичной обработки сигналы ВНЗ со значимой амплитудой; сплошная зеленая линия — результаты моделирования частотной зависимости минимального группового пути P_m мода распространения 1F2; черная линия — результаты моделирования дальности

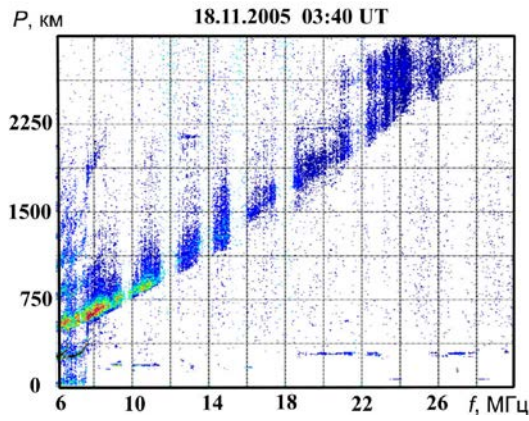


Рис. 3. Ионограмма ВНЗ для 18.11.2005, 03:40 UT

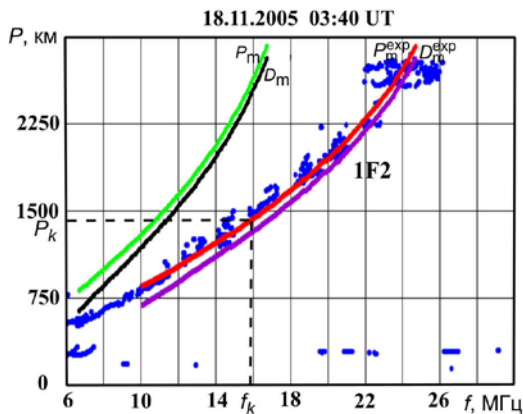


Рис. 4. Результаты обработки и интерпретации ионограммы ВНЗ для 18.11.2005, 03:40 UT

до границы освещенной зоны D_m . Моделирование характеристик сигналов ВНЗ проводилось на основе решения уравнения стационарности (2) с использованием профилей электронной концентрации, рассчитанных по модели IRI. Входной параметр модели — индекс солнечной активности $F10.7$. Сплошной красной линией показаны результаты интерпретации сигналов ВНЗ P_m^{exp} , приходящих в точку приема после однократного отражения от слоя F2. Частотная зависимость $P_m^{\text{exp}}(f)$ фактически является масштабированной $P_m(f)$ и соответственно близка к передней границе сигнала ВНЗ на ионограмме. Выделение переднего фронта сигнала $P_m^{\text{exp}}(f)$ позволяет рассчитать соответствующую частотную зависимость границы освещенной зоны $D_m^{\text{exp}}(f)$ с использованием адиабатического соотношения P_m/D_m на относительной сетке частот $\nu = f/\bar{f}_m$, которое слабо меняется при вариациях параметров ионосферы [Пonomарчук и др., 2018; Penzin et al., 2019]. Здесь \bar{f}_m — максимальная применимая частота для предельной дальности скачка. Для заданного группового пути P_k вычисляется отношение $\eta = P_k/D_m$ с использованием зависимости $P_m(f)$ и $D_m(f)$ (см. рис. 4). Далее по значению P_k на реальной $P_m^{\text{exp}}(f)$ определяются частота f_k и соответствующая даль-

ность до границы освещенной зоны $D_k^{\text{exp}} = P_k/\eta$. На рис. 4 частотная зависимость $D_m^{\text{exp}}(f)$ показана фиолетовой линией.

ИНВЕРСИЯ ИОНОГРАММ

Схема инверсии переднего фронта сигнала ВНЗ для определения параметров ионосферы (f_{cr}, h_m) состоит из трех этапов.

1. На сетке частот $f_k, k = \overline{1, N}$ рассчитываются функции $D_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ и $P_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ для различных допустимых пар значений параметров ионосферы (f_{cr}, h_m) с квазипараболической зависимостью профиля $N_e(r)$. Параметры квазипарабол h_b и h_0 определяются из h_m согласно заданным коэффициентам k_b и k_0 . Расчет $D_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ и $P_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ проводится на основе решения трансцендентного уравнения стационарности (2) в рамках сферически-симметричного волновода Земля—ионосфера.

2. По заданной частоте f_k определяется групповой путь P_k с использованием $P_m^{\text{exp}}(f)$ и значение дальности D_k до границы освещенной зоны с использованием $D_m^{\text{exp}}(f)$.

3. Определяется пара значений параметров ионосферы $(f_{\text{cr}}, h_m)_k$ из равенств

$$D_k = D_m^k(f_{\text{cr}}, h_m), \tag{5}$$

$$P_k = P_m^k(f_{\text{cr}}, h_m) \tag{6}$$

как точка пересечения двух кривых, являющихся решениями (5) и (6) с заданными D_k и P_k .

На рис. 5 показана поверхность $D_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ для $f_k=16$ МГц с линией решения равенства (5) с соответствующей дальностью $D_k=1329.12$ км (см. рис. 4). На рис. 6 показана поверхность $P_m^k(f_{\text{cr}}, h_m)$ для $f_k=16$ МГц с линией решения равенства (6) с $P_k=1436.87$ км. На рис. 7 даны решения равенств (5) и (6) для частоты $f_k=16$ МГц с $D_k=1329.12$ км и $P_k=1436.87$ км на плоскости (f_{cr}, h_m) .

В качестве примера на рис. 8 показаны временные вариации критической частоты f_{cr} и высоты максимума h_m слоя F2 на удалении 1500 км от пункта излучения, полученные по результатам инверсии ионограмм ВНЗ, полученных на ЛЧМ-ионозонде в ноябре 2005 г. Азимут излучения — 55° . Время регистрации — 18.11.2005, 00:00–08:00 UT. Красная линия — результаты инверсии ионограмм ВНЗ, синяя — результаты расчета по модели IRI, черная — экспериментальные значения параметров, полученные из ионограмм ВЗ на ионосферной станции Якутск ($62^\circ, 129.7^\circ$).

Граница освещенной зоны, соответствующая дальности D_k , формируется областью ионосферы на удалении $D_k/2$ от излучателя, исходя из геометрии линии каустики в волноводе для нисходящих траекторий односкачкового мода распространения. Ниже линии каустики расположена мертвая зона для приема сигналов. Поэтому расчет пара-

метров ионосферы на сетке частот $f_k, k = \overline{1, N}$ с соответствующими P_k и D_k , позволяет построить двумерное распределение электронной концентрации в направлении ВНЗ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение отметим основные отличия представленной схемы инверсии переднего фронта сигнала ВНЗ в параметры квазипараболического ионосферного слоя F2 от известных схем инверсии.

1. Для получения единственного решения обратной задачи варьируется, помимо минимального группового пути, дальность до границы освещенной зоны. Определение реальной дальности до границы освещенной зоны по выделенному переднему фронту сигнала ВНЗ является основным элементом в предлагаемой схеме инверсии ионограмм ВНЗ в параметры ионосферы.

2. Другим оригинальным элементом схемы является использование предварительных расчетов минимального группового пути и дальности до границы освещенной зоны как функции двух переменных — критической частоты и высоты максимума слоя F2 для различных частот зондирования, что позволяет использовать схему инверсии ионограмм ВНЗ в режиме реального времени.

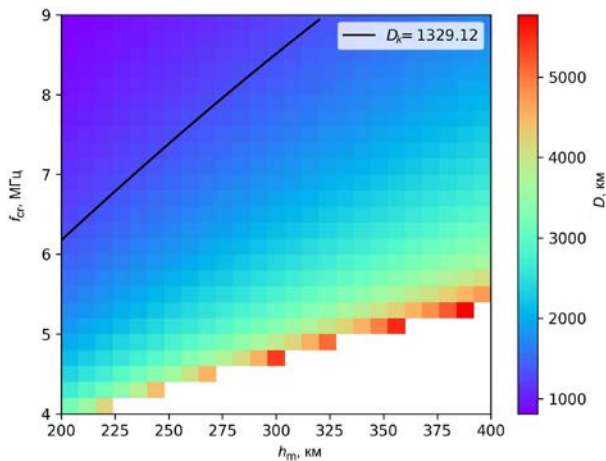


Рис. 5. Поверхность $D_m^k(f_{cr}, h_m)$

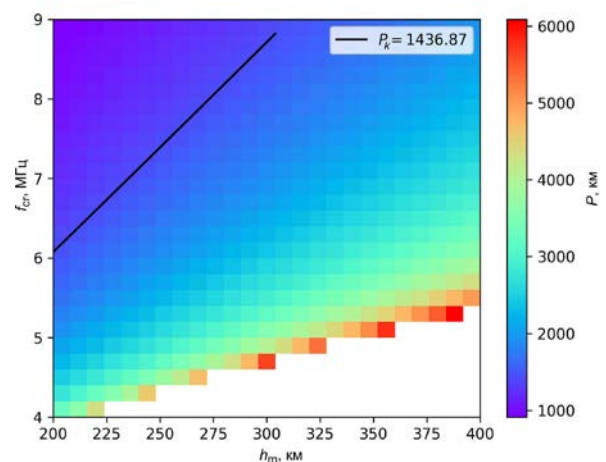


Рис. 6. Поверхность $P_m^k(f_{cr}, h_m)$

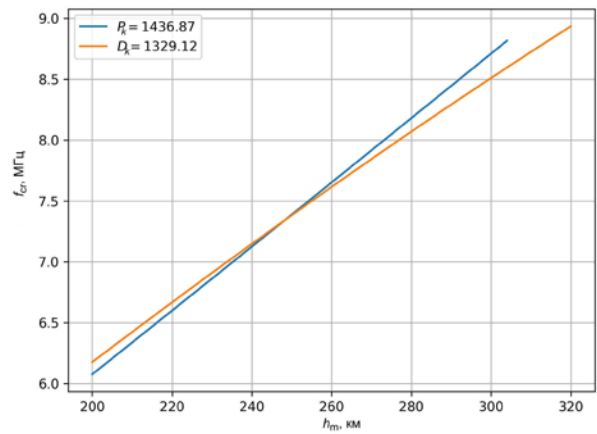


Рис. 7. Решения системы равенств (5) и (6) для частоты $f_k = 16$ МГц с $D_k = 1329.12$ км и $P_k = 1436.87$ км

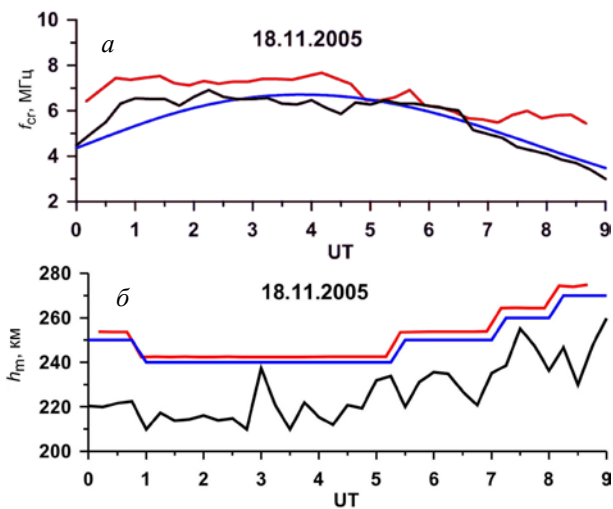


Рис. 8. Временные вариации параметров слоя F2 на удалении 1500 км от пункта излучения: а — критическая частота f_{cr} , б — высота максимума h_m

Также отметим, что точность определения параметров ионосферного слоя в рамках предлагаемой схемы инверсии ионограмм ВНЗ напрямую зависит от результата выделения переднего фронта сигнала ВНЗ, по которому восстанавливается частотная зависимость дальности до границы освещенной зоны.

В дальнейшем предполагается развить схему инверсии переднего фронта сигнала ВНЗ в параметры слоя F2 на ионосферные слои E и F1.

Работа выполнена в рамках базового финансирования программы ФНИ П.12 и при поддержке гранта РФФИ №19-02-00513-а. Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Куркин В.И., Орлов И.И., Попов В.Н. Метод нормальных волн в проблеме коротковолновой радиосвязи. М.: Наука, 1981. 122 с.
 Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-иозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические иссл. 2013. Вып. 4. С. 24–31.

Пономарчук С.Н., Грозов В.П., Котович Г.В. и др. Диагностика КВ-радиоканала по данным возвратно-наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4, № 2. С. 47–54. DOI: [10.12737/szf-42201804](https://doi.org/10.12737/szf-42201804).

Пономарчук С.Н., Куркин В.И., Пензин М.С. Исследование особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-ионозонда // Солнечно-земная физика. 2017. Т. 3, № 3. С. 61–69. DOI: [10.12737/szf-33201706](https://doi.org/10.12737/szf-33201706).

Benito E., Bourdillon A., Bourdillon A., Rannou V. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans // J. Atm. Solar-Terr. Phys. 2008. V. 70, N 15. P. 1935–1948. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.031).

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions // Space Weather. 2017. V. 15, N 2. P. 418–429.

Croft T.A. Hoogansian H. Exact ray calculations in a quasi-parabolic ionosphere with no magnetic field // Radio Sci. 1968. V. 3, N 1. P. 69–74.

Davies K.. Ionospheric Radio Waves. Blaisdell, London, 1969. 460 p.

Li N., Zhao Z., Zhou C., et al. Inversion of sweep frequency backscatter ionogram from Monostatic HF Sky-Wave Radar // IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett. 2013. V. 10, N 6. P. 1360–1364.

Norman R.J., Dyson P.L. HF radar backscatter inversion technique // Radio Sci. 2006. V. 41. RS4010, DOI: [10.1029/2005RS003355](https://doi.org/10.1029/2005RS003355).

Penzin M.S., Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kurkin V.I. Real-time techniques for interpretation of ionospheric backscatter sounding data // Radio Sci. 2019. V. 54, iss. 5. P. 480–491. DOI: [10.1029/2018RS006656](https://doi.org/10.1029/2018RS006656).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Oinats A.V. The diagnostics of ionosphere and earth ground surface by backscatter sounding data // Proc. PIERS-2009. Moscow, 2009. V. I–II, P. 1307–1310.

Rao N.N. Inversion of sweep-frequency sky-wave backscatter leading edge for quasiparabolic ionospheric layer parameters // Radio Sci. 1974. V. 9, N 10. P. 845–847.

REFERENCES

Benito E., Bourdillon A., Bourdillon A., Rannou V. Inversion of HF backscatter ionograms using elevation scans. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 2008, vol. 70, no. 15, pp. 1935–1948. DOI: [10.1016/j.jastp.2008.09.031](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2008.09.031).

Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., Shubin V., Galkin I., Reinisch B., Huang X. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017, vol.15, no. 2, pp. 418–429.

Croft T.A. Hoogansian H. Exact ray calculations in a quasi-parabolic ionosphere with no magnetic field. *Radio Sci.* 1968, vol. 3, no. 1, pp. 69–74.

Davies K. Ionospheric Radio Waves. Blaisdell, London, 1969. 460 p.

Kurkin V.I., Orlov I.I., Popov V.N. *Metod normalnykh voln v problem korotkovolnvoi svyazi* [Normal Wave Technique in HF Radio Communication Problem]. Moscow, Nauka, 1981. (In Russian).

Li N., Zhao Z., Zhou C., Chen G., Yang G., Huang S., Li T. Inversion of sweep frequency backscatter ionogram from Monostatic HF Sky-Wave Radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Lett.* 2013, vol. 10, no. 6, pp. 1360–1364.

Norman R.J., Dyson P.L. HF radar backscatter inversion technique. *Radio Sci.* 2006, vol. 41, RS4010. DOI: [10.1029/2005RS003355](https://doi.org/10.1029/2005RS003355).

Penzin M.S., Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kurkin V.I.

Real-time techniques for interpretation of ionospheric backscatter sounding data. *Radio Sci.* 2019, vol. 54, iss. 5, pp. 480–491. DOI: [10.1029/2018RS006656](https://doi.org/10.1029/2018RS006656).

Podlesnyi A.V., Brynko I.G., Kurkin V.I., et al. Multifunctional chirp ionosonde for monitoring the ionosphere. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophys. Res.]. 2013, no. 4, pp. 24–31. (In Russian).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Oinats A.V. The diagnostics of ionosphere and earth ground surface by backscatter sounding data. *Proc. PIERS-2009. Moscow, 2009.* vol. I–II, pp. 1307–1310.

Ponomarchuk S.N., Grozov V.P., Kotovich G.V., Kurkin V.I., Penzin M.S. Diagnostics of HF radio channel: based on data from backscatter ionospheric sounding by continuous chirp signal. *Solar-Terrestrial Physics.* 2018, vol. 4, iss. 2. pp. 17–23. DOI: [10.12737/stp-42201804](https://doi.org/10.12737/stp-42201804).

Ponomarchuk S.N., Kurkin V.I., Penzin M.S. Features of backscatter ionospheric sounding as studied with a chirp ionosonde. *Solar-Terr. Phys.* 2017, vol. 3, iss. 3, pp. 54–60. DOI: [10.12737/stp-332017062017](https://doi.org/10.12737/stp-332017062017).

Rao N.N. Inversion of sweep-frequency sky-wave backscatter leading edge for quasiparabolic ionospheric layer parameters. *Radio Sci.* 1974, vol. 9, no. 10. pp. 845–847.

Как цитировать эту статью

Пономарчук С.Н., Пензин М.С. Инверсия ионограмм возвратно-наклонного зондирования в параметры квазипараболического ионосферного слоя. *Солнечно-земная физика.* 2020. Т. 6, № 3. С. 82–87. DOI: [10.12737/szf-63202009](https://doi.org/10.12737/szf-63202009).