

МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРЫ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛЧМ-СИГНАЛОМ

TECHNIQUE OF IONOSPHERIC PARAMETER AUTOMATIC DETERMINATION USING DATA FROM VERTICAL SOUNDING WITH A CONTINUOUS CHIRP SIGNAL

С.Н. Пономарчук 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, spon@iszf.irk.ru

В.П. Грозов 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grozov@iszf.irk.ru

S.N. Ponomarchuk

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, spon@iszf.irk.ru

V.P. Grozov

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grozov@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлена методика определения параметров ионосферы на основе автоматической интерпретации ионограмм вертикального зондирования ионосферы (ВЗ). Интерпретация ионограмм проводится по точкам со значимой амплитудой, выделенным при вторичной обработке данных, с использованием результатов моделирования высотно-частотной характеристики (ВЧХ) сигналов ВЗ. Разработаны алгоритмы выделения треков ВЧХ сигналов, отраженных от E-, F1- и F2-слоев ионосферы, на основе анализа амплитудных характеристик сигналов и построения гистограмм распределения точек, попадающих по задержке сигнала в модельную маску ВЧХ при ее перемещении по ионограмме. Отдельно реализован алгоритм выделения треков сигналов, отраженных от спорадических слоев. По сформированной ВЧХ ВЗ определяются ионосферные параметры и рассчитывается профиль электронной концентрации.

Ключевые слова: распространение радиоволн, вертикальное зондирование ионосферы, ионограмма, профиль электронной концентрации, ЛЧМ-сигнал.

Abstract. We present a technique for determination of ionospheric parameters based on automatic interpretation of vertical sounding (VS) ionograms. Ionograms are interpreted using points with significant amplitude, which were detected after secondary data processing with results of modelling of VS signal height-frequency characteristic (HFC). We have developed algorithms to extract HFC tracks of signals reflected from the E, F1, and F2 layers. These algorithms involve analyzing signal amplitude characteristics and plotting distribution histograms of points falling into the HFC model mask when it is moved over the ionogram. The algorithm to detect tracks of signals reflected from sporadic layers is implemented separately. From the resultant VS HFC, we can estimate ionospheric parameters and calculate the electron density profile.

Keywords: radio wave propagation, ionospheric vertical sounding, ionogram, electron density profile, chirp signal.

ВВЕДЕНИЕ

Метод наземного вертикального зондирования (ВЗ) ионосферы не только не утратил своего ведущего положения в системе контроля состояния ионосферы, но и практически стал одним из основных методов диагностики быстрых динамических процессов в верхней атмосфере, вызванных гелиомагнитосферно-ионосферным взаимодействием. Диагностика состояния ионосферы как среды распространения коротких радиоволн позволяет адаптировать различного рода радиотехнические системы, включая когнитивное радио, к быстро меняющимся условиям распространения. В связи с резко возросшим объемом экспериментальных данных, получаемых с помощью выполненных по технологии SDR (Software-Defined Radio) ионозондов [Ivanov et al., 2019; Shindin et al., 2022; Kurkin et al., 2024], принципиальной становится автоматизация процессов вторичной обработки и интерпретации ионограмм.

Основная задача автоматической интерпретации ионограмм ВЗ — определение ионосферных параметров и восстановление профиля электронной концентрации. Подходы к решению данной задачи, опубликованные в многочисленных работах (см., например, обзор в работе [Chen et al., 2018]), в основном привязаны к ионограммам реальных ионозондов.

Целью работы является представление методики автоматического определения параметров ионосферы по данным вертикального зондирования с помощью моностатического ионозонда с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) сигнала, разработанного в Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ СО РАН) [Подлесный и др., 2013; Kurkin et al., 2024].

Решаемые задачи: вторичная обработка данных, идентификация регистрируемых сигналов, построение треков высотно-частотной характеристики (ВЧХ), восстановление профиля электронной концентрации по ВЧХ и определение ионосферных параметров.

Интерпретация ионограмм проводится по точкам со значимой амплитудой, выделенным при вторичной обработке данных [Grozov et al., 2012; Penzin et al., 2019], с использованием результатов моделирования высотно-частотной характеристики (ВЧХ) сигналов ВЗ по оперативной модели ионосферы. Разработаны алгоритмы выделения треков ВЧХ сигналов, отраженных от E-, F1- и F2-слоев ионосферы, на основе анализа амплитудных характеристик сигналов и построения гистограмм распределения точек, попадающих по задержке сигнала в модельную маску ВЧХ при ее перемещении по ионограмме. Отдельно реализован алгоритм выделения треков сигналов, отраженных от спорадических слоев. По сформированной ВЧХ ВЗ определяются ионосферные параметры и восстанавливается профиль электронной концентрации.

ОБРАБОТКА ИОНОГРАММ

Вертикальное зондирование ионосферы проводится с помощью моностатического ЛЧМ-иозонда [Подлесный и др., 2013; Kurkin et al., 2024]. По результатам спектрального анализа сигнала разностной частоты на выходе приемника формируется ионограмма ВЗ — зависимость группового времени распространения сигнала от частоты. В общем виде регистрируемая ионограмма ВЗ — матрица амплитуд \tilde{A}_{nm} . Каждый элемент матрицы $\tilde{A}(f_i, h'_j)$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, определяется двумя характеристиками — действующей высотой отражения h'_j и частотой f_i . Для выделения массива точек, соответствующих моментам прихода сигналов со значимой амплитудой, проводится вторичная обработка ионограммы путем фильтрации исходных данных с последующим сжатием их методом клеточного автомата [Grozov et al., 2012; Penzin et al., 2019]. После вторичной обработки ионограммы ВЗ формируется новая матрица экспериментальных точек $A(f_i, h'_j)$, соответствующая массиву точек со значимой амплитудой $(f, h', A)_k$, $k = \overline{1, M}$. Ионограмма ВЗ с результатами вторичной обработки данных показана на рис. 1. На ней выделены точки со значимой амплитудой, соответствующие сигналам, однократно отраженным от слоя F2 и однократно (1E_s) и двукратно (2E_s) отраженным от спорадического слоя E_s.

ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ

Автоматическая интерпретация ионограмм ВЗ проводится на основе анализа выделенных точек $A(f_i, h'_j)$ с использованием результатов моделирования высотно-частотной характеристики $h'(f)$, где f — частота зондирования, по оперативной полуэмпирической модели ионосферы. Оперативная модель ВЧХ, разработанная в ИСЗФ СО РАН, основана на разложении узловых параметров ВЧХ — критических частот f_oE , f_oF1 , f_oF2 и действующих высот $h'F$, $h'F2$, h_pF , $h'F1$ — по естественным орто-

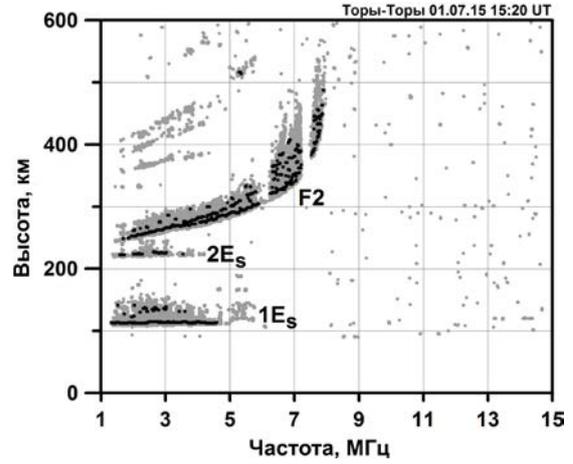


Рис. 1. Ионограмма ВЗ (серые точки) и результаты вторичной обработки (черные точки)

гональным функциям (ЕОФ) [Dvinskikh, 1988]. Массив узловых параметров ВЧХ сформирован согласно эмпирической части полуэмпирической модели ионосферы, разработанной в Иркутском государственном университете [Поляков и др., 1986]. Каждый из семи параметров, зависящий от местного времени t , месяца s , индекса солнечной активности $F10.7$ и модифицированного наклона X , представлен с помощью трехкратного разложения по ЕОФ в виде

$$b(t, s, F, X) = \sum_{i=1}^{l_1} \sum_{j=1}^{l_2} \sum_{k=1}^{l_3} X_i(t) Y_{ij}(s) Z_{ijk}(F) V_{ijk}(X). \quad (1)$$

По узловым параметрам восстанавливается монотонная ВЧХ. ВЧХ слоев F1 и F2 аппроксимируется квадратичной функцией $h'(f) = af^2 + df + c$. Коэффициенты полинома определяются по двум параметрам узловых значений функции в предположении, что в первой точке слоя выполняется условие равенства нулю первой производной функции. Тогда выражение для $h'(f)$ запишется в виде

$$h'(f) = \frac{(f - f_1)^2}{(f_2 - f_1)^2} (h'_2 - h'_1) + h'_1, \quad (2)$$

где (f_1, h'_1) и (f_2, h'_2) соответствуют началу и концу аппроксимируемого слоя. Для расчета ВЧХ слоя E используется формула, полученная при переводе $N(h)$ -профиля, описанного параболой, в действующие высоты

$$h'(f) = (h_m E - y_m E) + (y_m E / 2) (f / f_o E) \ln \frac{1 + f / f_o E}{1 - f / f_o E}, \quad (3)$$

где $h_m E$ — высота максимума слоя E; $y_m E$ — полутолщина слоя; в модели $h_m E = 120$ км, $y_m E = 20$ км.

Заметим, что ВЧХ можно рассчитать по профилю электронной концентрации $N(h)$ [Крашенинников, Ляной, 1991; Михайлов, 2000; Вертоградов и др., 2018] из прогнозной модели ионосферы (например, [Bilitza et al., 2017]).

Интерпретация ионограмм ВЗ проводится по следующей схеме:

- построение амплитудных характеристик для сигналов, отраженных от слоев ионосферы;
- выделение треков и идентификация сигналов, отраженных от слоев E и E_s;
- выделение области нахождения сигналов, отраженных от слоев F1 и F2;
- определение предельной частоты отражения сигнала ВЗ и контрольных точек ВЧХ;
- построение модельных масок для слоев F1 и F2 и определение их местоположения на ионограмме;
- выделение и идентификация следа обыкновенной компоненты для сигналов, отраженных от слоев F1 и F2;
- формирование ВЧХ ВЗ и определение параметров ионосферных слоев.

Рассмотрим процесс интерпретации ионограммы по данному алгоритму на примере отражения сигналов ВЗ от двухслойной ионосферы (рис. 2). Прогнозная ВЧХ $h'(f)$ показана на рис. 2 синей линией. На первом этапе рассчитывается амплитудно-высотная характеристика $\Psi(h') = \sum_i A^2(f_i, h'_j)$. Суммирование проводится по точкам частотного диапазона f_i для фиксированной высоты h'_j . Усредненная по десяти точкам характеристика $\Psi(h')$ показана фиолетовой линией. Первые локальные максимумы зависимости $\Psi(h')$ определяют высотные коридоры нахождения точек со значимой амплитудой для сигналов, отраженных от слоев E и E_s. На рисунке данные коридоры отмечены розовым цветом. В полосе действующих высот от 90 до 160 км выделяются точки, соответствующие моментам прихода сигналов, однократно отраженных от слоев E и E_s. Далее определяется частота f_{mE} первого локального максимума в выбранном массиве точек. Формируется модельная маска — полоса шириной Δh вдоль ВЧХ слоя E в частотном диапазоне от $\mu f_o^{pr}E$ до $f_o^{pr}E$, где $f_o^{pr}E$ — прогнозная критическая частота слоя E. Значения Δh и μ можно варьировать в зависимости от разрешения ионозонда по задержке и шага по частоте. По максимуму числа точек из массива $(f, h', A)_k, k = \overline{1, M}$, попадающих в маску при ее перемещении по ионограмме, в прямоугольнике с границами $f \in [1, \max(f_o^{pr}E, f_{mE}) + 0.32]$ и $h \in [90, 160]$ определяется реальная критическая частота f_o^rE и формируется трек ВЧХ слоя E. Если в маску попадает меньше трех точек, то значение f_o^rE выбирается равным прогнозному значению $f_o^{pr}E$ и трек соответствует прогнозной ВЧХ слоя E. Из оставшихся точек со значимой амплитудой формируется трек сигналов, отраженных от слоя E_s. В случае присутствия на ионограмме ВЗ сигналов двукратного и более отражений от E_s-слоя также проводится их идентификация и выделение треков по максимумам функции $\Psi(h')$. Идентификация сигналов двукратного отражения от слоя E_s на ионограмме, приведенной на рис. 2, проводится в прямоугольной полосе, соответствующей локальному максимуму зависимости $\Psi(h')$ и расположенной на удвоенной высоте трека сигналов при однократном отражении. Аналогично

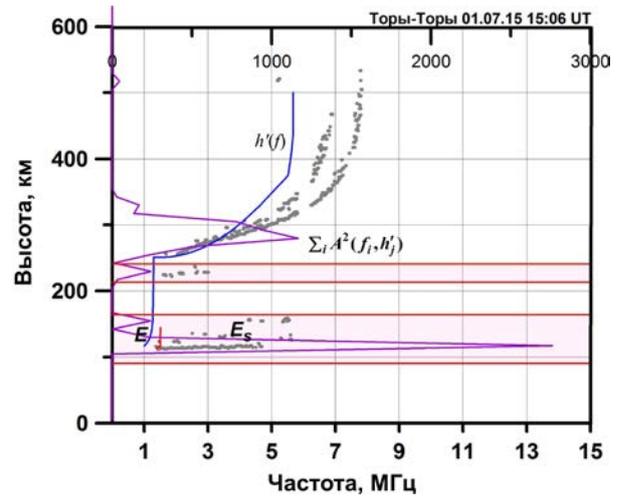


Рис. 2. Ионограмма ВЗ: результаты обработки — серые точки; модельная маска — вертикальная красная черта; прогноз $h'(f)$ — синяя линия; амплитудно-высотная характеристика — фиолетовая линия

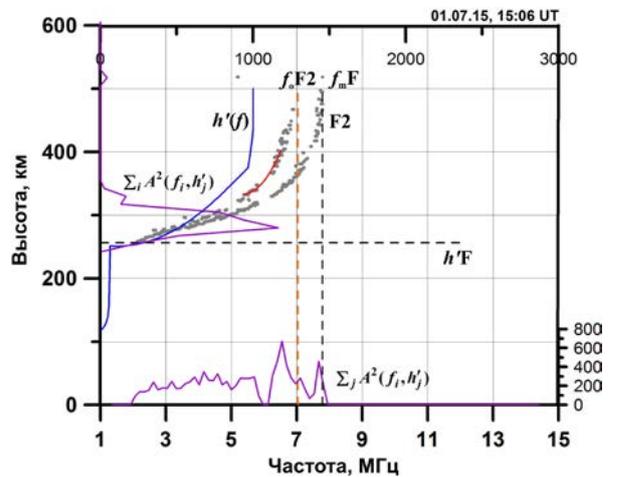


Рис. 3. Ионограмма ВЗ: результаты обработки — серые точки; модельная маска — красная линия; прогноз $h'(f)$ — синяя линия; амплитудные характеристики — фиолетовые линии

можно выделить треки сигналов с большим числом отражений от слоя E_s. Реализован оперативный алгоритм определения параметров и выделения треков сигналов, отраженных от слоев E и E_s. По результатам интерпретации сигналов, отраженных от слоя E_s, определяется высота разделения ионограммы на области отражения сигналов от слоев E и F.

На рис. 3 приведена ионограмма ВЗ без сигналов, отраженных от слоев E и E_s. Дополнительно к характеристике $\Psi(h')$ рассчитывается амплитудно-частотная характеристика $\Phi(f) = \sum_j A^2(f_i, h'_j)$. Суммирование проводится по точкам высотной (временной) развертки сигнала h'_j на фиксированной частоте f_i , при этом выбираются точки со значимой амплитудой $(f, h', A)_k, k = \overline{1, M}$, попадающие по высоте отражения в верхнюю выделенную часть ионограммы. На рис. 3 показана амплитудно-частотная характеристика $\sum_j A^2(f_i, h'_j)$, усредненная по семи точкам.

По локальным экстремумам амплитудных характеристик $\Psi(h')$ и $\Phi(f)$ можно определить контроль-

ные параметры треков ВЧХ для сигналов на ионограмме. Например, предельная частота отражения зондирующего сигнала от ионосферы $f_m F$ определяется по нулевому уровню характеристики $\Phi(f)$ и, как правило, соответствует критической частоте $f_x F2$ отражения необыкновенной компоненты сигнала от слоя F2 при отсутствии возмущений в ионосфере. На рис. 3 частота $f_m F$ отмечена черной вертикальной штриховой линией. Относительно $f_m F$ можно приблизительно определить критическую частоту слоя F2: $f_o F2 = f_m F - f_H / 2$, где f_H — гирочастота электронов. В алгоритме используется $f_H = 1.5$ МГц. На рис. 3 частота $f_o F2$ отмечена оранжевой вертикальной штриховой линией. Данный способ определения $f_o F2$ позволяет реализовать оперативный алгоритм расчета критической частоты слоя F2 без дальнейшего восстановления полной ВЧХ для определения параметров слоев F-области и расчета профиля электронной концентрации. По амплитудно-высотной характеристике $\Psi(h')$ определяется минимальная высота расположения F-слоя $h'F$.

На следующем этапе проводится построение модельной маски для слоя F2 — полосы шириной Δh вдоль прогнозной ВЧХ слоя F2 (синяя линия на рис. 3) в частотном диапазоне от $\beta f_o^{PF} F2$ до $f_o^{PF} F2$, где $f_o^{PF} F2$ — прогнозная критическая частота слоя F2. По максимуму гистограммы распределения числа точек $(f, h', A)_k, k = 1, M$, попадающих в модельную маску при ее перемещении по ионограмме, определяется ее местоположение на ионограмме. По точкам, попадающим в модельную маску, строится фрагмент трека ВЧХ для сигналов, отраженных от слоя F2, с использованием аппроксимации данных методом наименьших квадратов. Аппроксимирующая кривая может не проходить через экспериментальные точки, однако является приближением исследуемой зависимости и сглаживает выбросы, возникающие из-за погрешностей эксперимента. На рис. 3 данный участок трека показан сплошной красной линией. Для построения полного трека ВЧХ слоя F2 проводится продолжение модельного трека вверх и вниз по выделенным точкам со значимой амплитудой с помощью методов непрерывного связывания или, в случае отсутствия точек, экстраполяции. Для трехслойной ионосферы алгоритм интерпретации ионограммы ВЗ дополняется процедурой определения по амплитудным характеристикам $\Phi(f)$ и $\Psi(h')$ дополнительных контрольных параметров ВЧХ: минимальной высоты $h'F1$ и критической частоты $f_o F1$ слоя F1, точек локальных минимумов ВЧХ (рис. 4). Определение местоположения модельных масок для слоев E, F1 и F2 на ионограмме с использованием контрольных параметров позволяет уверенно построить полную ВЧХ для трехслойной ионосферы.

ПАРАМЕТРЫ ИОНОСФЕРЫ

В результате интерпретации ионограммы ВЗ формируется высотно-частотная характеристика $h'(f)$ для слоев E, F1 и F2. По ВЧХ производится определение ионосферных параметров: критических частот и минимальных высот отражения для каждого

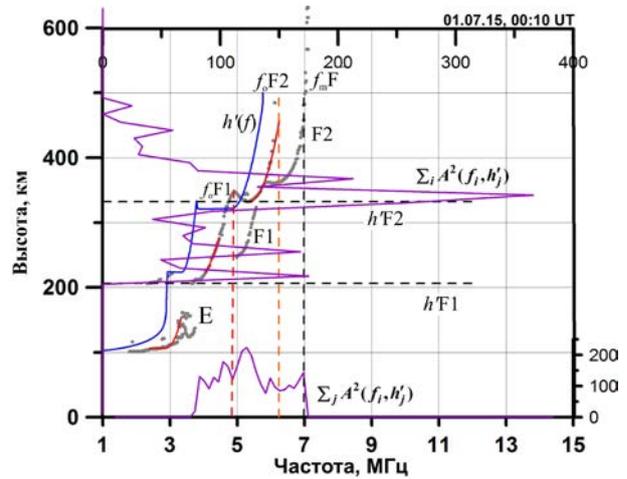


Рис. 4. Ионограмма ВЗ: результаты обработки — серые точки; модельные маски — красные сплошные линии; прогноз $h'(f)$ — синяя линия; амплитудные характеристики — фиолетовые линии

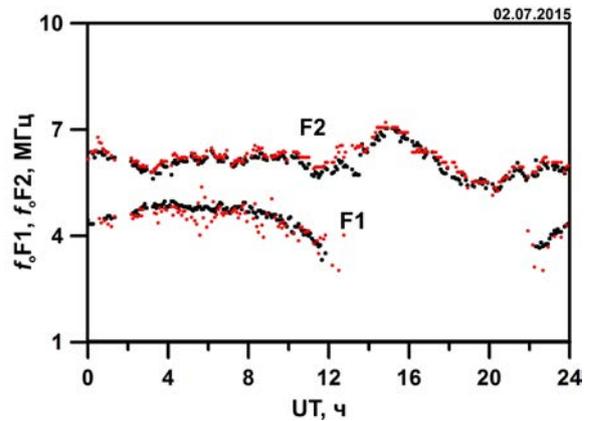


Рис. 5. Результаты определения критических частот F1- и F2-слоев для 2 июля 2015 г.: красные точки — автоматическая обработка, черные — ручная обработка

ионосферного слоя; минимальных частот отражения от слоев E и F2. Дополнительно при обработке и интерпретации ионограммы ВЗ выделяется трек спорадического слоя E_s, по которому определяются критическая частота, минимальная высота отражения и частоты экранировки вышележащих слоев ионосферы.

На рис. 5 приведены результаты определения критических частот слоев F1 и F2 для 2 июля 2015 г. Сквозность зондирования составляла 1 мин, скорость сканирования — 500 кГц/с. Для оценки достоверности вычислялись относительные ошибки

$$\delta = \frac{f_o^{\text{manual}} - f_o^a}{f_o^{\text{manual}}} \cdot 100 \%,$$

где f_o^{manual} , f_o^a — критические частоты слоя, полученные в результате ручной и автоматической обработки ионограмм соответственно. На рис. 6 приведены распределения относительной ошибки определения критических частот слоев F1 и F2 для 2 июля 2015 г. Стандартное отклонение относительных ошибок определения $f_o F1$ составило 5 %, $f_o F2$ — 2.7 %.

По ВЧХ рассчитывается также профиль плазменной частоты $f_c(h) = \sqrt{80.6N(h)}$. Для реконструкции

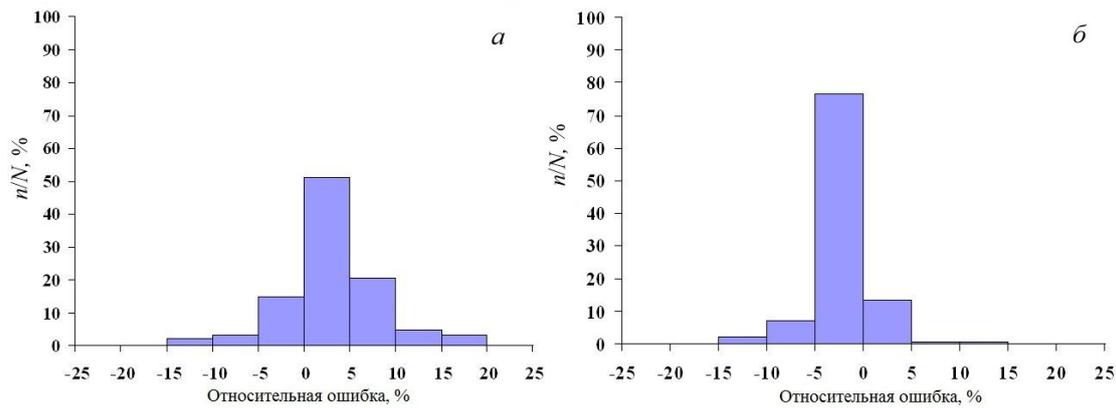


Рис. 6. Распределения относительных ошибок определения критических частот слоя F1 (а) и слоя F2 (б) для 2 июля 2021 г.

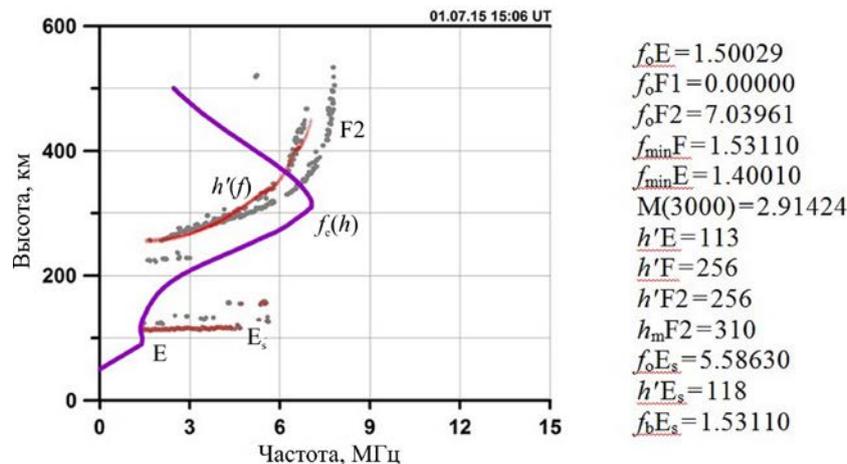


Рис. 7. Ионосферные параметры (справа) и обработанная ионограмма ВЗ 1 июля 2015 г. в 15:06 UT (слева): результаты вторичной обработки — серые точки; характеристика $h'(f)$ и слой E_s — красные линии; плазменная частота $f_c(h)$ — фиолетовая линия

высотного профиля плазменной частоты $f_c(h)$ используется численное решение интегральных уравнений посредством модификации метода Джексона с повышением точности в областях максимумов слоев (прикритических частот) и долин [Михайлов, 2000]. По полученному $f_c(h)$ -профилю определяются дополнительные ионосферные параметры слоя F2: критическая частота f_oF2 , высота максимума h_mF2 и коэффициент $M(3000)$ [Дэвис, 1973]. Результаты выделения ВЧХ $h'(f)$, расчета профиля плазменной частоты $f_c(h)$ и определения параметров ионосферных слоев 1 июля 2015 г. в 15:06 UT и 00:10 UT для двухслойной и трехслойной ионосферы приведены на рис. 7 и 8 соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

На основе разработанных алгоритмов был реализован программный комплекс автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВЗ. Валидация алгоритмов проводилась по данным вертикального зондирования, полученными в различные сезоны 2021 г. на ЛЧМ-ионозонде [Kurkin et al., 2024]. Сквозность зондирования составляла 15 с, скорость сканирования — 1000 кГц/с. На рис. 9 приведены результаты определения критической частоты слоя F2 в январе 2021 г. Наиболее заметно различие между

результатами ручной и автоматической обработки для ночных часов местного времени 15 января, когда наблюдалось интенсивное F-рассеяние (см. рис. 9, а, ионограмма в 16 UT). Ручная обработка проводилась согласно руководству URSI по интерпретации и обработке ионограмм [Руководство..., 1977].

На рис. 10 приведены результаты ручной и автоматической обработки ионограмм ВЗ в различные дни марта 2021 г.

Наибольшие затруднения вызывает обработка ионограмм ВЗ в летние месяцы года в условиях многослойной ионосферы и присутствия отражений от спорадического слоя E_s . На рис. 11 приведены результаты автоматической обработки ионограмм в июле 2021 г., когда постоянно регистрировались мощные отражения от слоя E_s , экранирующие отражения сигналов от F-области ионосферы. На верхней левой панели рис. 11 приведены суточные вариации критической частоты слоя E_s 1 июля 2021 г. Как видно на ионограмме в 14:45 UT, количество отражений сигналов от слоя E_s достигало 5. На средней и нижней левых панелях рис. 11 приведены результаты определения критических частот F1- и F2-слоев. Ионограммы в 09:05 и 16:00 UT иллюстрируют возможности разработанных алгоритмов интерпретации при выделении отражений от F-области в присутствии

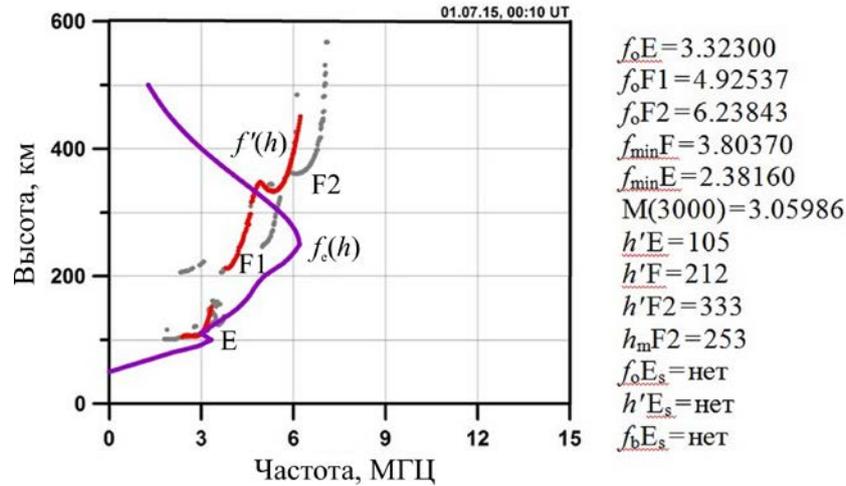


Рис. 8. Ионосферные параметры (справа) и обработанная ионограмма ВЗ 1 июля 2015 г. в 00:10 UT (слева): результаты вторичной обработки — серые точки; характеристика $h'(f)$ — красные линии; плазменная частота $f_c(h)$ — фиолетовая линия

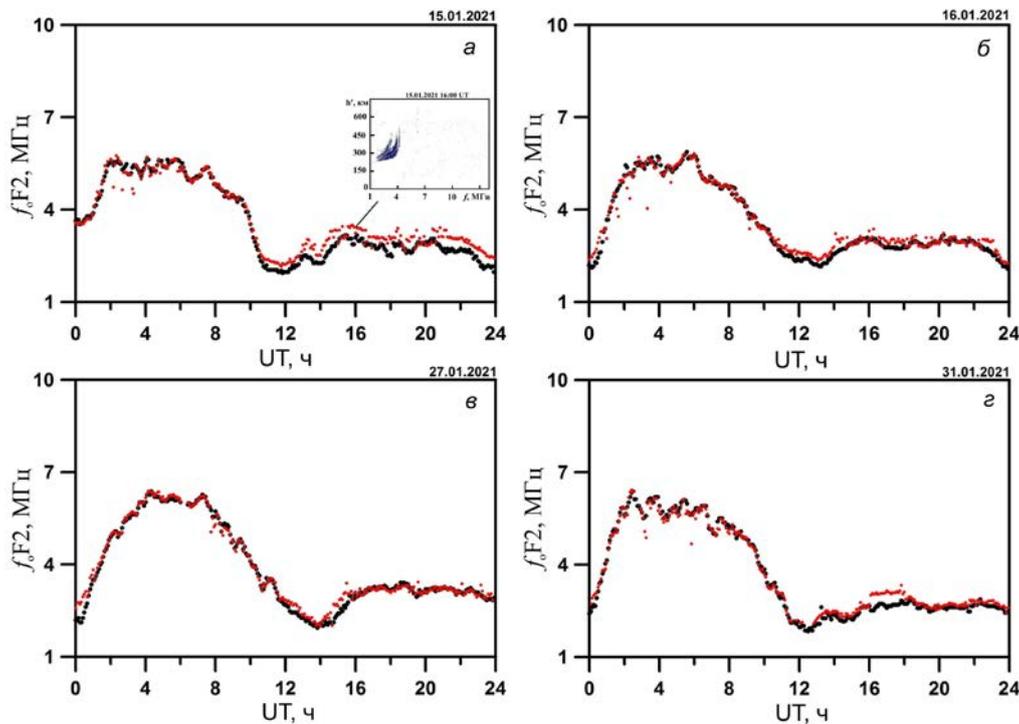


Рис. 9. Результаты определения критической частоты F2-слоя в январе 2021 г.: красные точки — автоматическая обработка; черные — ручная обработка

полупрозрачного слоя E_s . Основные ошибки интерпретации отражений от слоев F1 и F2 связаны с малым отношением сигнал/шум в высокоскоростном режиме получения ЛЧМ-ионограмм. Сквозность регистрации ионограмм меньше 1 мин. Магнитоионная необыкновенная компонента x для сигналов, отраженных от слоя F2, имеет малую амплитуду. При вторичной обработке сигналы с x -компонентой отсеиваются по отношению сигнал/шум, что приводит к ошибке определения предельной частоты отражения от F-области f_mF .

На рис. 12 приведены результаты определения критической частоты f_oF2 в октябре 2021 г.

В таблице приведены результаты тестирования разработанных алгоритмов в различные месяцы

2021 г. — стандартные отклонения относительных ошибок определения критических частот слоев E_s , F1 и F2. Генеральная выборка для каждого месяца составляла не менее 1200 ионограмм.

Исходя из опыта эксплуатации программного комплекса автоматической обработки и интерпретации ионограмм ВЗ в различных гелиогеофизических

Стандартные отклонения относительных ошибок определения критических частот (%)

Дата	E_s	F1	F2
январь 2021 г.	—	—	6.6
март 2021 г.	—	8.3	7.4
июль 2021 г.	7.2	12.2	7.5
октябрь 2021 г.	—	—	4.2

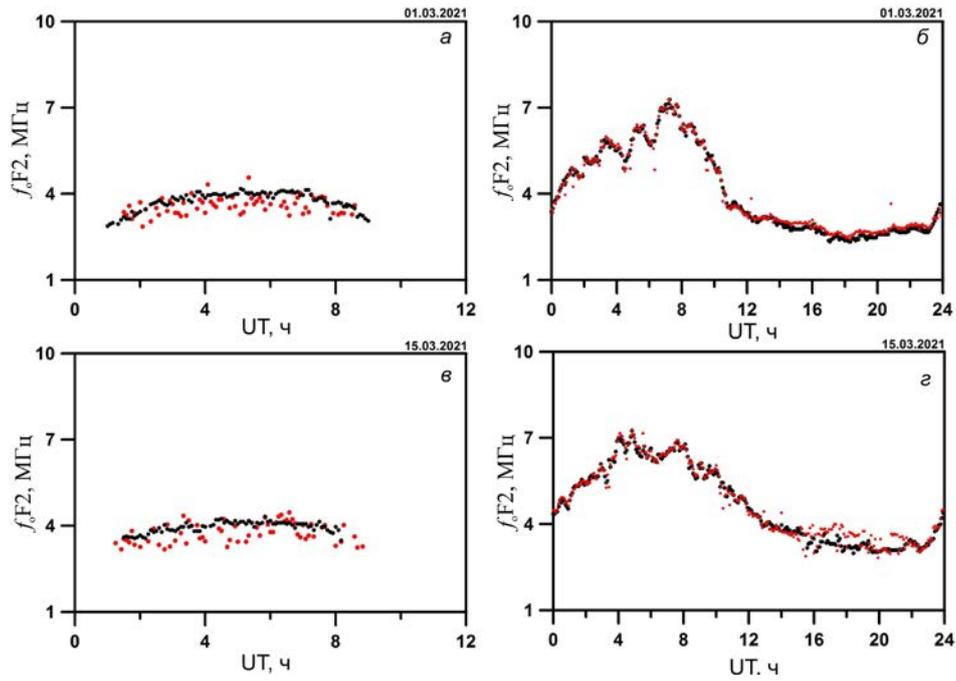


Рис. 10. Результаты определения критических частот слоев F1 (а, в) и F2 (б, г) 1 и 15 марта 2021 г.: красные точки — автоматическая обработка, черные — ручная обработка

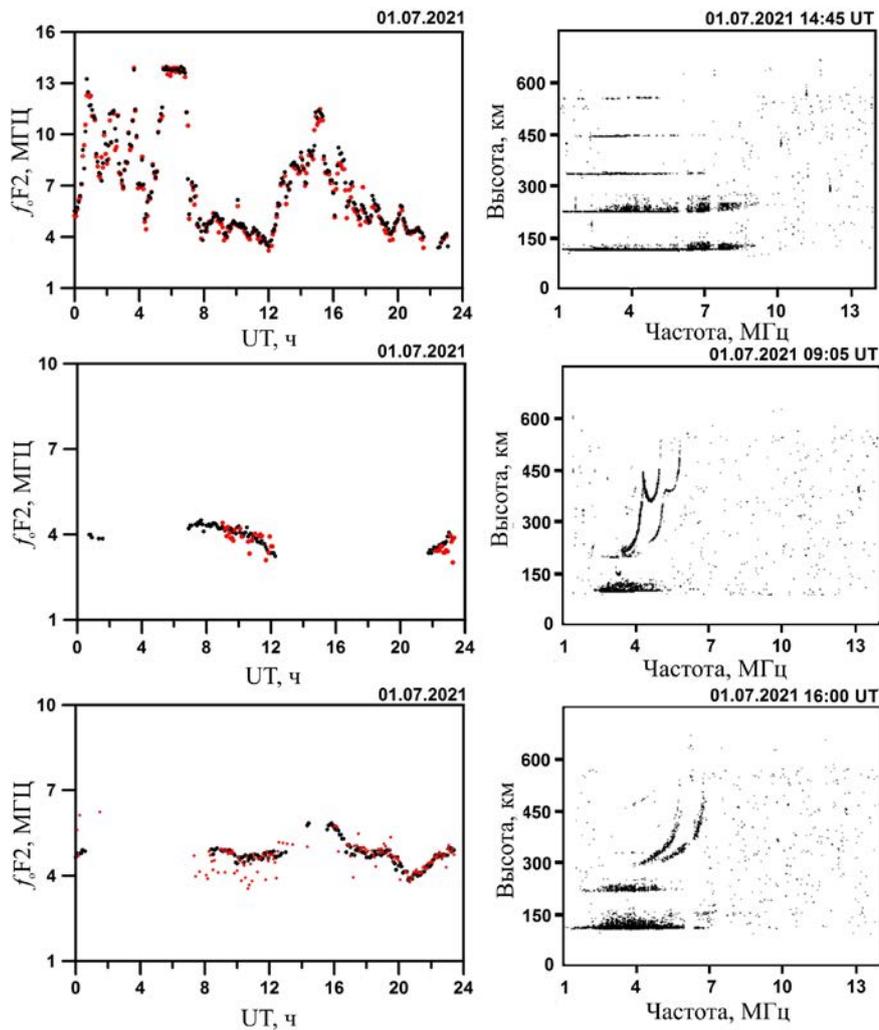


Рис. 11. Результаты определения критических частот слоев E_s, F1 и F2 (слева сверху вниз) по ионограммам ВЗ в 09:05, 14:45, 16:00 UT (справа сверху вниз) 1 июля 2021 г.: красные точки — автоматическая обработка, черные — ручная обработка

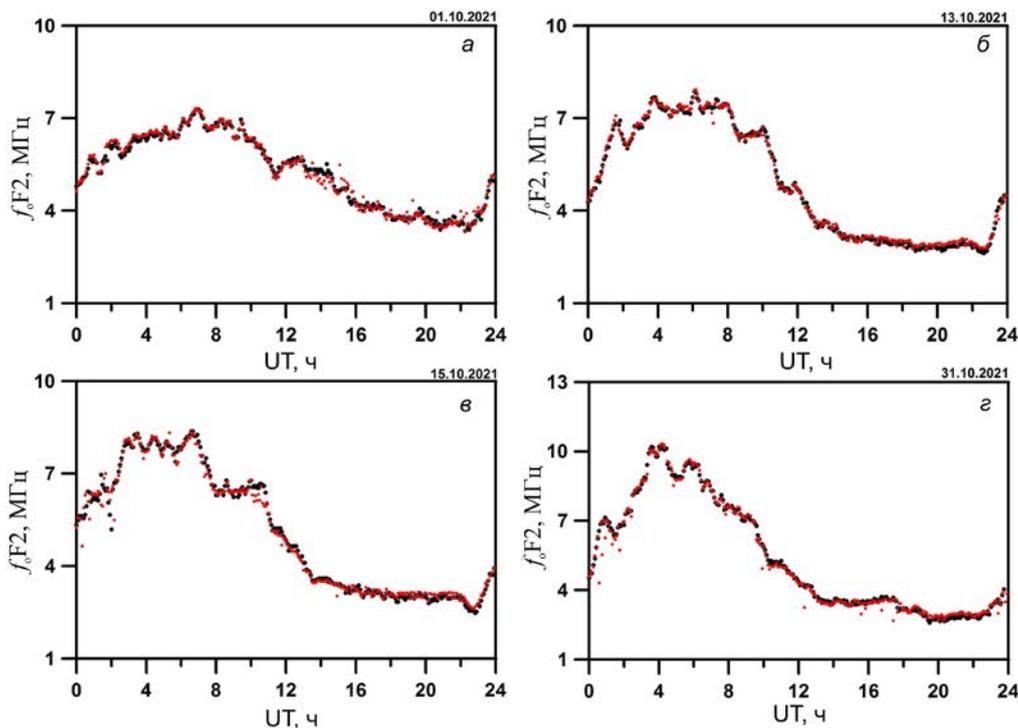


Рис. 12. То же, что на рис. 9, для октября 2021 г.

условиях, можно сформулировать рекомендации по использованию комплекса при ЛЧМ-зондировании ионосферы. Программный комплекс рекомендуется к использованию в следующих условиях:

- 1) отсутствуют сосредоточенные помехи с малым отношением сигнал/шум;
- 2) отсутствуют ионосферные возмущения, вызванные геомагнитными бурями;
- 3) отсутствуют перемещающиеся ионосферные возмущения, приводящие к регистрации дополнительных серповидных сигналов на ионограммах.

Рекомендуется также применять программный комплекс для обработки и интерпретации ионограмм вертикального зондирования слоистой среды без боковых отражений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика автоматического определения параметров ионосферы по точкам со значимой амплитудой сигнала, выделенным при вторичной обработке ионограмм ВЗ. Разработаны алгоритмы построения треков сигналов, отраженных от слоев ионосферы, на основе анализа амплитудных характеристик сигналов. В результате интерпретации ионограммы ВЗ формируется высотно-частотная характеристика $h'(f)$ для слоев E, F1 и F2. По ВЧХ ВЗ производится определение ионосферных параметров и восстанавливается высотный профиль электронной концентрации. Дополнительно выделяется трек спорадического слоя E_s. Реализован программный комплекс автоматической обработки и интерпретации ионограмм вертикального зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом. Выходными характеристиками комплекса являются: критические частоты и минимальные высоты отражения для каждого ионосферного слоя; минимальные частоты отражения от слоев E

и F2; высота максимума слоя F2 и коэффициент $M(3000)$; высотный профиль плазменной частоты. По треку спорадического слоя E_s определяются критическая частота слоя, минимальная высота отражения и частота экранировки вышележащих слоев ионосферы.

Наибольшие ошибки определения ионосферных параметров при автоматической обработке ионограмм ВЗ обусловлены:

- 1) ошибками прогнозирования треков ВЧХ по моделям ионосферы;
- 2) ложной интерпретацией x-компоненты отраженного от слоя F2 сигнала в условиях многолучевости регистрируемого сигнала;
- 3) экранировкой F-области слоем E_s в летние периоды;
- 4) наличием неоднородностей в ионосфере во время геомагнитных возмущений;
- 5) присутствием перемещающихся ионосферных возмущений;
- 6) малым отношением сигнал/шум регистрируемых сигналов.

Разработанные алгоритмы можно использовать для обработки больших массивов данных вертикального зондирования для выявления закономерностей и особенностей изменения основных параметров при анализе ионосферных событий. Разработанный комплекс программ может быть составной частью информационных систем прогнозирования распространения коротких радиоволн на трассах, оборудованных средствами диагностики ионосферы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (субсидия № 075-ГЗ/Ц3569/278). Экспериментальные данные получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Ангара» [<http://ckp-rf.ru/ckp/3056/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018, т. 61, № 6, с. 462–473.
- Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973, 502 с.
- Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. Об интерпретации одного вида перемещающегося ионосферного возмущения по ионограммам вертикального радиозондирования. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 1991, т. 31, № 3, с. 427–433.
- Михайлов С.Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения коротких радиоволн в изотропной ионосфере. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2000, т. XLII, № 10, с. 855–872.
- Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ-ионозонд для мониторинга ионосферы. *Гелиогеофизические исследования*. 2013, вып. 4, с. 24–31.
- Поляков В.М., Суходольская В.Е., Ивельская М.К. и др. *Полуэмпирическая модель ионосферы для широкого диапазона геофизических условий*. М.: 1986, 139 с.
- Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм*. Перевод с английского. М.: Наука, 1977, 342 с.
- Bilitza D., Altadill D., Truhlik V., et al. International Reference Ionosphere 2016: From ionospheric climate to real-time weather predictions. *Space Weather*. 2017, vol. 15, iss. 2, pp. 418–429. DOI: [10.1002/2016SW001593](https://doi.org/10.1002/2016SW001593).
- Chen Z., Gong Z., Zhang F., Fang G. A new ionogram automatic scaling method. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, iss. 9, pp. 1149–1164. DOI: [10.1029/2018RS006574](https://doi.org/10.1029/2018RS006574).
- Dvinskikh N.I. Expansion of ionospheric characteristics fields in empirical orthogonal functions. *Adv. Space Res.* 1988, vol. 8, iss. 4, pp. 179–187. DOI: [10.1016/0273-1177\(88\)90238-4](https://doi.org/10.1016/0273-1177(88)90238-4).
- Grozov V.P., Ilyin N.V., Kotovich G.V., Ponomarchuk S.N. Software system for automatic interpretation of ionosphere sounding data. *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2012, vol. 22, iss. 3, pp. 458–463. DOI: [10.1134/S1054661812030042](https://doi.org/10.1134/S1054661812030042).
- Ivanov V.A., Ivanov D.V., Ryabova N.A., et al. Studying the parameters of frequency dispersion for radio links of different length using software-defined radio based sounding system. *Radio Sci.* 2019, vol. 54, iss. 1, pp. 34–43. DOI: [10.1029/2018RS006636](https://doi.org/10.1029/2018RS006636).
- Kurkin V.I., Medvedeva I.V., Podlesnyi A.V. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia. *Adv. Space Res.* 2024, vol. 73, iss. 7, pp. 3613–3623. DOI: [10.1016/j.asr.2023.09.020](https://doi.org/10.1016/j.asr.2023.09.020).
- 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).
- Shindin A.V., Moiseev S.P., Vybornov F.I., et al. The prototype of a fast vertical ionosonde based on modern software-defined radio devices. *Remote Sensing*. 2022, vol. 14, iss. 3, 547. DOI: [10.3390/rs14030547](https://doi.org/10.3390/rs14030547).
- URL: <http://ckp-rf.ru/ckp/3056/> (дата обращения 26 июня 2025 г.).
- Как цитировать эту статью:*
Пономарчук С.Н., Грозов В.П. Методика автоматического определения параметров ионосферы по данным вертикального зондирования непрерывным ЛЧМ-сигналом. *Солнечно-земная физика*. 2026, т. 12, № 1, с. 55–63. <https://doi.org/10.12737/szf-121202607>.