

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ШЕРСТЮКОВ О.Н., ЗЫКОВ Е.Ю., АКЧУРИН А.Д.  
ИМПУЛЬСНОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРЫ  
(учебно-методическое пособие)

Казань-2011

Печатается по решению Редакционно-издательского совета  
физического факультета Казанского государственного университета

УДК

Шерстюков О.Н., Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д. Импульсное радиозондирование  
ионосферы. Казань, 2011. –27с.

Настоящее учебно-методическое пособие предназначено для использования в спецпрактикуме магистерского направления подготовки «Радиофизические методы исследования в атмосфере, ионосфере и околоземном космическом пространстве» на физическом факультете КГУ.

Пособие содержит описание физических основ вертикального импульсного зондирования ионосферы, программно-аппаратного комплекса, параметров регистрации, а также заданий, которые необходимо выполнить в данном спецпрактикуме. Оно может быть также полезно студентам и аспирантам, которые интересуются радиофизическими методами исследования природных сред.

Рецензент: Насыров И.А., канд. физ.-мат. наук, доц. каф. радиоэлектроники  
Казанского университета.

© Физический факультет Казанского государственного университета, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Структура ионосферы.....	4
2. Основы распространения радиоволн в ионосфере. ....	6
3. Метод импульсного радиозондирования.....	11
4. Физическая интерпретация ионограмм .....	15
5. Описание структуры ионозонда и его характеристики .....	17
6. Описание программного обеспечения ионозонда .....	20
7. Порядок выполнения работы .....	26
Литература. ....	27

## 1. Структура ионосферы

Гипотеза о существовании проводящего слоя в верхней атмосфере была высказана в 1878 г. английским ученым Стюартом для объяснения особенностей геомагнитного поля. Затем в 1902 г., независимо друг от друга, Кеннеди в США и Хевисайд в Англии указали, что для объяснения распространения радиоволн на большие расстояния необходимо предположить существование в высоких слоях атмосферы областей с большой проводимостью. В 1923 г. академик М.В.Шулейкин, рассматривая особенности распространения радиоволн различных частот, пришел к выводу о наличии в ионосфере не менее двух отражающих слоев. Затем в 1925 г. английские исследователи Эпплтон и Барнет, а также Брейт и Тьюв впервые экспериментально доказали существование областей, отражающих радиоволны, и положили начало их систематическому изучению. С того времени ведется систематическое изучение свойств этих слоев, в целом называемых ионосферой, играющих существенную роль в ряде геофизических явлений, определяющих отражение и поглощение радиоволн, что очень важно для практических целей, в частности для обеспечения надежной радиосвязи. В нашей стране в 1930-е г. по инициативе М.А.Бонч-Бруевича были созданы установки для импульсного ее зондирования. Были исследованы многие общие свойства ионосферы, высоты и электронная концентрация основных ее слоев.

Основной источник ионизации земной атмосферы – ультрафиолетовое и рентгеновское излучение Солнца, возникающее главным образом в солнечной хромосфере и короне. Кроме того, на степень ионизации верхней атмосферы влияют солнечные корпускулярные потоки, возникающие во время вспышек на Солнце, а также космические лучи и метеорные частицы. Излучение Солнца ионизирует атомы и молекулы атмосферы. Степень ионизации становится существенной уже на высоте 60 километров и неуклонно растет с удалением от Земли. На различных высотах в атмосфере происходят после-

довательно процессы диссоциации различных молекул и последующая ионизация различных атомов и ионов. В основном это молекулы кислорода  $O_2$ , азота  $N_2$  и их атомы. В зависимости от интенсивности этих процессов различные слои атмосферы, лежащие выше 60-ти километров, называются ионосферными слоями, а их совокупность ионосферой. Максимальная концентрация заряженных частиц в ионосфере достигается на высотах 300–400 км.

На высотах 60–70 км наблюдается слой D, на высотах 100–120 км слой E, на высотах 180–300 км двойной слой  $F_1$  и  $F_2$ . Основные параметры этих слоев приведены в Таблице 1. Суточные изменения плотности электронной концентрации довольно значительны (рис. 1).

Таблица 1.

Область ионосферы	Высота максимума, км	$T_i, K$	День		Ночь, $n_e, \text{см}^{-3}$	$\alpha', \text{см}^3 \text{с}^{-1}$
			мин $n_e, \text{см}^{-3}$	макс $n_e, \text{см}^{-3}$		
D	70	20	100	200	10	$10^{-6}$
E	110	270	$1.5 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^3$	$10^{-7}$
F1	180	800-1500	$3 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	-	$3 \cdot 10^{-8}$
F2 (зима)	220-280	1000-2000	$6 \cdot 10^5$	$25 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-10}$
F2 (лето)	250-320	1000-2000	$2 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$3 \cdot 10^5$	$10^{-10}$

$n_e$  – электронная концентрация,  $e$  – заряд электрона,  $T_i$  – температура ионов,  $\alpha'$  – коэффициент рекомбинации (который определяет величину  $n_e$  и ее изменение во времени)

На рис. 1 приведены средние профили электронной концентрации, поскольку они меняются для различных широт, в зависимости от времени суток и сезонов. Подобные данные необходимы для обеспечения дальней радиосвязи. Они используются при выборе рабочих частот для различных коротковолновых линий радиосвязи. Знание их изменения в зависимости от состояния ионосферы в разное время суток и в разные сезоны исключительно важно для обеспечения надежности радиосвязи.

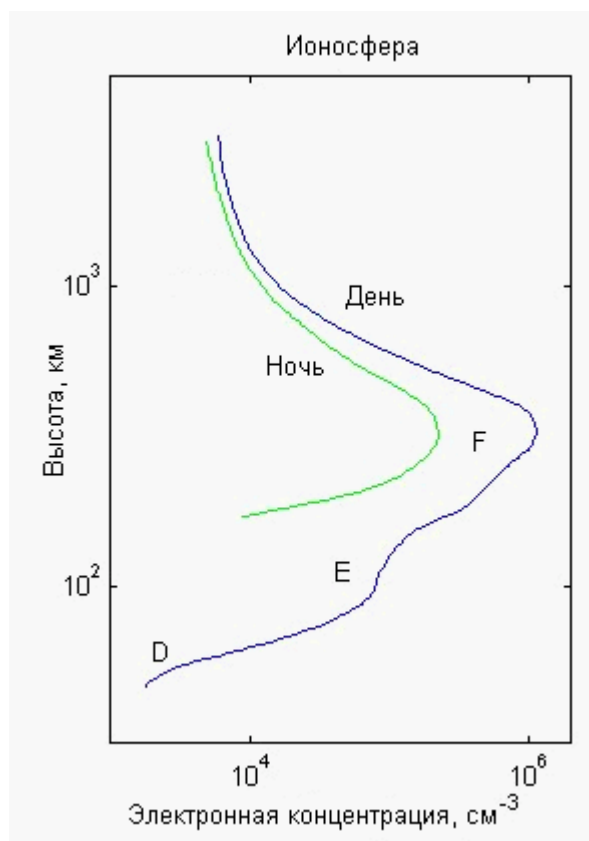


Рис.1. Изменения электронной концентрации с высотой для дня и ночи.

## 2. Основы распространения радиоволн в ионосфере

В многокомпонентной плазме, содержащей электроны, ионы и нейтральные молекулы и пронизанной магнитным полем Земли, могут возникать различные виды собственных колебаний, имеющих разные частоты. Например, плазменные (ленгмюровские) частоты электронов  $\omega_0 = \sqrt{4\pi N e^2 / m}$  и ионов  $\Omega_0 = \sqrt{4\pi N e^2 / M}$ , гиромагнитные частоты электронов  $\omega_H = e H_0 / m c$  и ионов  $\Omega_H = e H_0 / M c$ , где  $m$ ,  $M$  - массы электрона и иона,  $e$  - их заряд,  $N$  - концентрация,  $H_0$  - напряжённость магнитного поля Земли. Так как  $M \gg m$ , то  $\omega_0 \gg \Omega_0$ ,  $\omega_H \gg \Omega_H$ . Например, для электронов  $\omega_H / 2\pi = 1,4$  МГц, а для ионов атомарного кислорода  $\Omega_H / 2\pi = 54$  Гц.

В зависимости от частоты  $\omega$  радиоволны основная роль в распространении радиоволн играют те или другие виды собственных колебаний, поэтому электрические свойства ионосферы различны для разных участков радиодиа-

пазона. При высоких  $\omega$  ионы не успевают следовать за изменениями поля и в распространении радиоволн принимают участие только электроны. Вынужденные колебания свободных электронов ионосферы происходят в противофазе с действующей силой и вызывают поляризацию плазмы в сторону, противоположную электрическому полю волны  $E$ . Поэтому диэлектрическая проницаемость ионосферы  $\varepsilon < 1$ . Она уменьшается с уменьшением частоты:  $\varepsilon = 1 - \omega_0^2/\omega^2$ . Учёт соударений электронов с атомами и ионами даёт более точные формулы для  $\varepsilon$  и удельной электропроводности  $\sigma$  ионосферы:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2 + \nu^2}; \quad \sigma = \frac{\omega_0^2 \nu}{4\pi(\omega^2 + \nu^2)}.$$

Здесь  $\nu$  - эффективная частота соударений. Для декаметровых и более коротких волн в большей части ионосферы  $\omega^2 \gg \nu^2$  и показатели преломления  $n$  и поглощения  $\kappa$  приближённо равны:

$$n \approx \sqrt{1 - \omega_0^2/\omega^2}, \quad \kappa \approx 2\pi\sigma/\omega \sqrt{\varepsilon}$$

Поскольку  $n < 1$ , фазовая скорость распространения радиоволн  $u_\phi = c/n > c$ , групповая скорость  $u_{гр} = c \cdot n < c$ .

Поглощение в ионосфере пропорционально  $\nu$ , так как чем больше число столкновений, тем большая часть энергии, получаемой электроном из волн, переходит в тепло. Поэтому поглощение больше в нижних областях ионосферы (слой  $D$ ), где  $\nu$  больше, так как выше плотность газа. С увеличением частоты поглощение уменьшается. Короткие волны испытывают слабое поглощение и распространяются на большие расстояния.

*Рефракция радиоволн в ионосфере.* В ионосфере распространяются только радиоволны с частотой  $\omega > \omega_0$ . При  $\omega < \omega_0$  показатель преломления

становится чисто мнимым и электромагнитное поле экспоненциально убывает в глубь плазмы. Радиоволна с частотой  $\omega$ , падающая на ионосферу вертикально, отражается от уровня, на котором  $\omega = \omega_0$  и  $n = 0$ . В нижней части ионосферы электронная концентрация и  $\omega_0$  увеличиваются с высотой, поэтому с увеличением  $\omega$  посланная с Земли волна всё глубже проникает в ионосферу. Максимальная частота радиоволны, которая отражается от слоя ионосферы при вертикальном падении, называется критической частотой слоя:

$$\omega_{кр} = \omega_{0 \text{ макс}} = \sqrt{4\pi e^2 N_{\text{макс}} / m}.$$

Критическая частота слоя  $F2$  изменяется в течение суток и года в широких пределах (от 3-5 до 10 МГц). Для волн с  $\omega > \omega_{кр}(F2)$  показатель преломления не обращается в нуль и падающая вертикально волна проходит через ионосферу, не отражаясь.

При наклонном падении волны на ионосферу происходит рефракция. В нижней части ионосферы  $\text{grad } n \approx -(10^{-4} - 10^{-5}) \text{ м}^{-1}$ , т. е.  $|\text{grad } n| \gg 1/R_0$ , поэтому  $\text{grad } n_{пр} \approx \text{grad } n < 0$  и траектория луча отклоняется по направлению к Земле (рис. 2). Радиоволна, падающая на ионосферу под углом  $\varphi_0$ , поворачивает к Земле на высоте  $h$ , для которой выполнено условие (5). Максимальная частота волны, отражающейся от ионосферы при падении под углом (т. е. для данной дальности трассы), равна  $\omega_{МПЧ} = \omega_{кр} \sec \varphi_0 > \omega_{кр}$  и называется максимально применимой частотой (МПЧ). Волны с  $\omega < \omega_{МПЧ}$ , отражаясь от ионосферы, возвращаются на Землю, что используется для дальней радиосвязи.



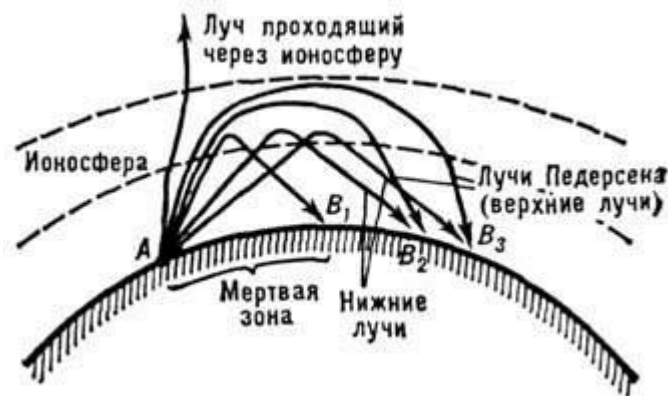


Рис. 2. Схематическое изображение радиолучей определённой частоты при различных углах падения на ионосферу.

Вследствие сферичности Земли величина угла  $\varphi_0$  ограничена и дальность связи при однократном отражении от ионосферы меньше 3500-4000 км. Связь на большие расстояния осуществляется за счёт нескольких последовательных отражений от ионосферы и Земли ("скачков"). Возможны и более сложные волноводные траектории, возникающие за счёт горизонтального градиента  $N$  или рассеяния на неоднородностях ионосферы при распространении радиоволн с частотой  $\omega > \omega_{\text{мпч}}$ . В результате рассеяния угол падения луча на слой  $F2$  оказывается больше, чем при обычном распространении. Луч испытывает ряд последовательных отражений от слоя  $F2$ , пока не попадёт в область с таким градиентом  $N$ , который вызовет отражение части энергии назад к Земле.

*Влияние магнитного поля Земли  $H_0$ .* В магнитном поле  $H_0$  на электрон, движущийся со скоростью  $v$ , действует Лоренца сила  $\mathbf{F} = (-e/c)[\mathbf{vH}_0]$ , под влиянием которой он вращается по окружности в плоскости, перпендикулярной  $H_0$ , с гиромангнитной частотой  $\omega_H$ . Траектория каждой заряженной частицы – винтовая линия с осью вдоль  $H_0$ . Действие силы Лоренца приводит к изменению характера вынужденных колебаний электронов под действием электрического поля волны, а следовательно, к изменению электрических

свойств среды. В результате ионосфера становится анизотропной гиротропной средой, электрические свойства которой зависят от направления распространения радиоволн и описываются не скалярной величиной  $\epsilon$ , а тензором диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{ij}$ . Падающая на такую среду волна испытывает двойное лучепреломление, то есть расщепляется на две волны, отличающиеся скоростью и направлением распространения, поглощением и поляризацией. Если направление распространения радиоволн  $\perp \mathbf{H}_0$ , то падающую волну можно представить себе в виде суммы двух линейно поляризованных волн с  $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}_0$  и  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{H}_0$ . Для первой, "необыкновенной", волны ( $x$ ) характер вынужденного движения электронов под действием поля волны  $\mathbf{E}$  изменяется (появляется компонента ускорения, перпендикулярная  $\mathbf{E}$ ) и поэтому изменяется  $n$ . Для второй, "обыкновенной", волны ( $e$ ) вынужденное движение остаётся таким же, как и без поля  $\mathbf{H}_0$  (при  $\mathbf{v} \parallel \mathbf{H}_0$  сила Лоренца равна 0). Для этих двух волн (без учёта соударений) квадраты показателей преломления равны

$$n_e^2 = 1 - \frac{\omega_0^2 (\omega^2 - \omega_0^2)}{\omega^2 (\omega^2 - \omega_0^2 - \omega_H^2)}; \quad n_o^2 = 1 - \omega_0^2 / \omega^2.$$

При распространении радиоволн вдоль  $\mathbf{H}_0$

$$n_e^2 = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega - \omega_H)}; \quad n_o^2 = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega(\omega + \omega_H)}.$$

В последнем случае обе волны имеют круговую поляризацию, причём у "необыкновенной" волны вектор  $\mathbf{E}$  вращается в сторону вращения электрона, а у "обыкновенной" - в противоположную сторону. При произвольном направлении распространения радиоволн (относительно  $\mathbf{H}$ ) поляризация нормальных волн эллиптическая.

По мере распространения радиоволн в ионосфере увеличивается сдвиг фаз между волнами и изменяется поляризация суммарной волны. Например, при распространении радиоволн вдоль  $H_0$  это приводит к повороту плоскости поляризации (*Фарадея эффект*), а при распространении радиоволн перпендикулярно  $H_0$  - к периодическому чередованию линейной и круговой поляризации (*Коттона - Мутона эффект*). Так как показатели преломления волн различны, отражение их происходит на разной высоте (рис. 3). Направление волнового вектора  $k$  при распространении радиоволн в ионосфере может отличаться от  $u_{гр}$ .

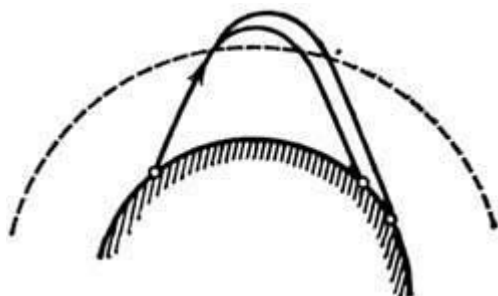


Рис.3. Расщепление радиоволны в результате двойного лучепреломления в ионосфере.

### 3. Метод импульсного радиозондирования

Одним из основных параметров ионосферы является плотность электронной концентрации, который может быть определен при импульсном вертикальном зондировании (ВЗ) ионосферы. Физическую основу метода составляют соотношения, определяющие величину показателя преломления в магнитоактивной плазме и условия отражения радиоволны, распространяющейся в такой среде. Аппаратно-программный комплекс, реализующий данный метод называется ионосферной станцией или ионозондом.

Практически метод реализуется следующим образом. Импульсный передатчик, находящийся на поверхности Земли, излучает импульсный сигнал, имеющий несущую частоту  $f$ . Длительность импульсного сигнала  $10^{-4}$ - $10^{-5}$  сек, так что в ионосферу излучаются квазимонохроматические группы волн.

От поверхности Земли до начала ионизированной области импульс распространяется по прямой со скоростью света  $c$ , далее траектория импульса искривляется. Одновременно начинает изменяться и скорость распространения. Ее значение тем меньше, чем выше концентрация свободных электронов, определяющая значения показателя преломления. В точке отражения показатель преломления  $n=0$ , скорость импульса уменьшается до нуля и происходит отражение от этой области. Для описания перемещения импульсного сигнала в ионосфере вводится понятие о групповом пути  $L_{gp}$ , который определяется как путь, пройденный импульсом от точки излучения до точки регистрации после отражения от слоя со скоростью  $c$ :

$$L_{gp} = c\Delta t_{gp} /$$

Время  $\Delta t_{gp}$  называется временем группового запаздывания, которое определяется как временной интервал между моментами регистрации излученного и отраженного сигнала.

Истинную высоту отражения импульсного сигнала определить сложно, поэтому непосредственно в процессе зондирования определяется кажущаяся высота отражения в предположении, что весь свой путь до точки отражения и обратно импульсные сигналы проходят с постоянной скоростью, равной скорости света в вакууме. Тогда кажущаяся (действующая) высота точки отражения определяется по измеренному интервалу времени  $\Delta t_{gp}$  с помощью соотношения:

$$h' = \frac{c\Delta t_{gp}}{2}.$$

Если изменять несущую частоту передатчика, то импульсные сигналы с различной несущей частотой будут отражаться от областей с разной электронной плотностью. Поскольку электронная плотность меняется с высотой, то эти импульсы испытывают различное по величине групповое запаздывание. Таким образом, возникает возможность определить высотный профиль

электронной концентрации. Поскольку отражения при ВЗ можно получить только в случае, если показатель преломления уменьшается по мере проникновения в глубь слоя, то, используя данный метод, можно зафиксировать только те участки высотного профиля электронной концентрации, которые характеризуются возрастанием электронной концентрации с высотой. Для выяснения вопроса о том, как изменяется электронная концентрация с высотой в промежутках между слоями (долины) и выше главного максимума, необходимо модифицировать метод, например, установить ионосферную станцию на спутник.

В результате ВЗ ионосферы мы получаем так называемую высотно-частотную характеристику (ВЧХ) – зависимость действующей (кажущейся) высоты отражения радиоимпульса от его несущей частоты или ионограмму (см. рис.4). На основании анализа конфигурации  $h'(f)$  можно определить ряд ионосферных параметров: критические частоты различных областей (критической называется несущая частота радиоимпульса, для которой данная область ионосферы становится прозрачной), можно определять значение электронной концентрации в слоях и действующие высоты для заданных частот, выбирать оптимальные частоты для заданных радиотрасс.

С помощью метода импульсного ВЗ получены длительные ряды наблюдений и изучены многие морфологические закономерности ионосферы. Во всем мире использовались аналоговые ионозонды, с примерно одинаковыми техническими характеристиками. Однако они обладали рядом технических недостатков, к которым можно отнести:

- жесткий режим работы аналогового ионозонда;
- низкую скорость получения ионограмм и трудоемкость их обработки, из-за регистрации их на фотопленке, или электрохимической, или электростатической бумаге;
- большую погрешность отсчета высоты отражения импульсного сигнала;

- отсутствие регистрации амплитуды сигнала, отраженного от ионосферы.

Все эти недостатки в какой-то степени могут быть преодолены при использовании цифровых ионосферных комплексов, производящих цифровую регистрацию амплитуд сигналов и имеющих в своем составе ЭВМ, для управления режимом зондирования и обработки результатов.

Первые цифровые комплексы в нашей стране появились в 70-х годах, что было связано с развитием элементной базы микроэлектроники, на основе которой это стало возможным. К ним следует отнести комплексы "Сойка", "Базис" и др. Однако их изготовление в единичных экземплярах не позволило произвести замену устаревших аналоговых ионозондов, работающих в составе ионосферной сети. Позднее, с развитием вычислительной техники и применением промышленных модулей были начаты разработки комплекса "Циклон", "Парус", "Бизон", а также ряд модификаций цифрового комплекса "Циклон", разработанных с участием авторов в Казанском университете. Однако из-за экономического положения в стране в 90-х годах, они также не были востребованы в полной мере.

За рубежом к наиболее простым цифровым ионозондам можно отнести польские комплексы KOS, канадские CADI и новозеландские IPS. Наибольшее распространение получил американский исследовательский комплекс Digizonde-256, оснащенный сложной антенной решеткой и позволяющий производить поляризационные измерения, регистрировать углы прихода и доплеровские сдвиги частоты отраженного сигнала. В настоящее время в среднеширотной области преимущественно над американским континентом создана глобальная ионосферная сеть DISS (Цифровых Ионосферных Зондирующих Систем), имеющая в своем составе более 20 ионозондов Digizonde-256 и работающая в режиме реального времени. Аналогичная сеть функционирует в Японии и включает в себя 5 ионозондов типа 9B.

Далее в работе будет представлено описание аппаратно-программной части комплекса "Циклон", обладающих техническими возможностями, которые позволяют использовать их, как для решения исследовательских задач, так и в качестве сетевых ионозондов.

#### **4. Физическая интерпретация ионограмм**

Ионограммы регистрируют следы отражений высокочастотных импульсных радиосигналов, генерируемых ионозондами. Эти отраженные сигналы формируют характерные "следы", которые и составляют ионограмму. Импульсные радиосигналы распространяются в ионосфере более медленно, чем в свободном пространстве, поэтому вместо истинной высоты регистрируется кажущаяся или "действующая" высота отражения, которая всегда превышает истинную высоту отражения. Для частот, достигающих слоя с максимальным уровнем электронной концентрации, действующая высота становится бесконечной. Частоты, на которых это происходит, называются критическими частотами. Характерные величины действующих высот (обозначаемых как  $h'E$ ,  $h'F$  и  $h'F2$  и т.д.) и критические частоты (обозначаемые как  $f_oE$ ,  $f_oF1$  и  $f_oF2$  и т.д.) для каждого слоя определяются из ионограмм вручную или автоматически с помощью специальных компьютерных программ.

Можно представить себе некоторую идеализированную высотно-частотную характеристику ионосферы, которая должна наблюдаться при вертикальном зондировании, и оценить тот минимальный набор параметров, который может быть с ионограммы снят (см. рис. 4). Выбор этих параметров, а также формулировке правил их отсчета придается очень большое значение, поскольку необходимо осуществлять обоснованное сопоставление данных, получаемых в разных пунктах Земли. Пример отсчета стандартных параметров ионосферы при ВЗ представлен на рис.5.

- 1) Критические частоты обыкновенной волны, отражающейся от регулярных слоев ионосферы F2, F1, E –  $f_oF2$ ,  $f_oF1$ ,  $f_oE$ .

- 2) Соответствующие критические частоты необыкновенной волны  $f_x F2$ ,  $f_x F1$ ,  $f_x E$ . Обычно эти характеристики определяются с целью повышения надежности определения критических частот обыкновенной компоненты.
- 3)  $f_o E_s$  – предельная (наивысшая) частота обыкновенной волны, отражающейся от слоя  $E_s$ . Если нельзя различить или установить, что отражается именно обыкновенная компонента, определяются  $f E_s$  – предельную видимую частоту  $E_s$ .
- 4)  $f_b E_s$  – наибольшая частота, до которой слой  $E_s$  экранирует лежащий над ним регулярный слой.
- 5)  $f_{min}$  – минимальная частота, начиная с которой на ионограмме виден след отражений от ионосферы.
- 6)  $h' F2$  – минимальная действующая высота наивысшего стабильного слоя области F.
- 7)  $h' F$  – минимальная действующая высота наинизшего слоя области F.
- 8)  $h' E$  и  $h' E_s$  – минимальные действующие высоты слоев E и  $E_s$ .
- 9)  $h_p F2$  – действующая высота слоя F2, отсчитываемая по ионограмме при частоте  $0,834 f_o F2$ . Численно она определяет высоту максимума ионизации слоя F2 в предположении параболического распределения ионизации вблизи максимума и без учета запаздывания волны в нижележащих слоях.

Обычно на ионосферных станциях регистрируют одну ионограмму каждые 15 минут. В случае ручной обработки определяются только часовые значения. Современные ионозонды с автоматической компьютерной обработкой переводят в численные данные все регистрируемые ионограммы. Окончательные численные величины вместе с оригинальными ионограммами и отчётами станций хранятся в пяти Мировых Центрах Данных по Ионосфере (МЦД по Ионосфере).



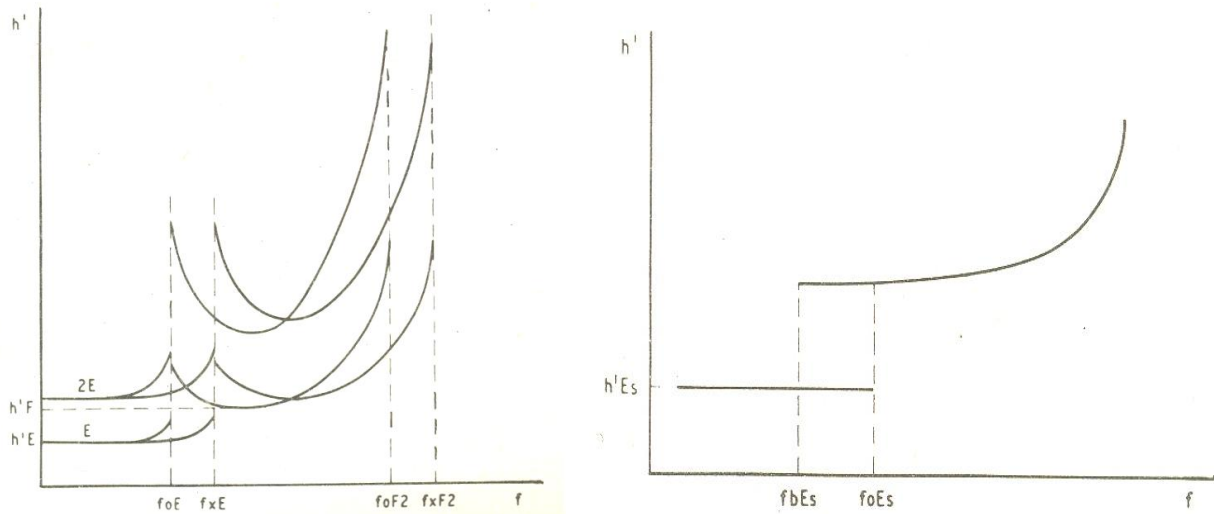


Рис. 4. Идеализированная ионограмма: а) при наличии двух слоев, б) при наличии тонкого слоя Es

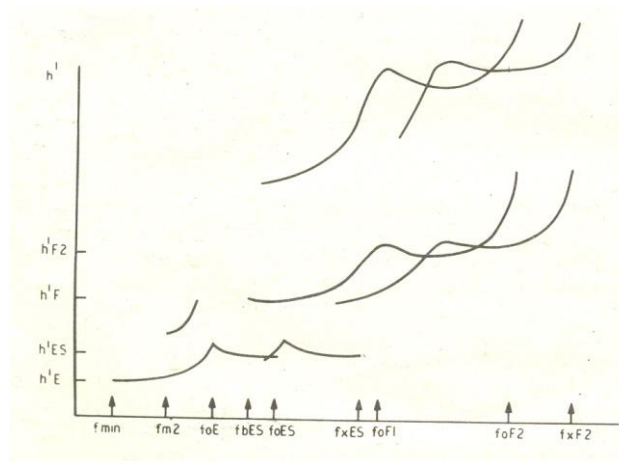


Рис. 5. Стандартные высотные и частотные параметры.

### 5. Описание структуры ионозонда и его характеристики

Ионосферный комплекс "Циклон" построен при максимальном использовании промышленных устройств и имеет в своем составе: приемное устройство Р-399 ("Катран") или Р-309 ("Прыжок"), импульсное радиопередающее устройство, синтезатор частот декаметрового диапазона Ч6-31, устройство хранения и привязки шкал времени Ч7-15, блок сопряжения и компьютер. Блок сопряжения необходим для осуществления привязки к шкале времени, установки различных приборов в необходимые режимы, тактирования

процессом перестройки и приемом цифровых отсчетов амплитуды принятого сигнала. Функционально комплекс выполнен в виде двух отдельных модулей: приемно-регистрирующего и передающего, что позволяет его использовать в двух режимах зондирования, вертикальном и наклонном. При вертикальном зондировании (ВЗ) модули совмещены и синхронизированы между собой по кабелю. При наклонном зондировании (НЗ) синхронизация осуществляется по радиоканалу, с помощью устройств хранения и привязки шкал времени.

Технические характеристики комплекса следующие:

- диапазон рабочих частот передающего модуля 1-21 МГц;
- излучаемая мощность передающего модуля 10 кВт;
- длительность зондирующего импульса 10-200 мкс;
- диапазон рабочих частот приемного модуля 1-32 МГц;
- закон изменения частот дискретный, с шагом не менее 1 кГц;
- количество зондирующих частот до 400;
- частота следования зондирующих импульсов 1-100 Гц;
- полоса пропускания приемника 20 кГц;
- количество зондирующих импульсов на одной частоте 1-256;
- дискретность отсчетов высоты при ВЗ 2,5 км, дальности при НЗ 5 км;
- диапазон наблюдаемых высот при ВЗ 70-640 км, дальностей при НЗ 0-1200 км;
- количество уровней оцифровки по амплитуде  $2^{10}$ ;
- при приеме и излучении используются отдельные дельта-антенны.

Работа комплекса в режимах НЗ подобна работе в режиме ВЗ, при этом в результате НЗ регистрируется дистанционно-частотная характеристика (ДЧХ), а не высотно-частотная характеристика (ВЧХ) или, другими словами, ионограмма. При регистрации ДЧХ, интервал времени, соответствующий пройденному радиоимпульсом групповому пути, не требует деления на два,

как это делается при регистрации ионограммы. Поэтому дискретность отсчетов высоты и диапазон наблюдаемых высот при ВЗ отличаются в два раза от сходных характеристик при НЗ.

Программное управление режимом зондирования (начальной и конечной частотой зондирования, законом перестройки несущей частоты, расписанием работы) позволяет осуществить прием сигналов любого цифрового и даже аналогового ионозонда, с известными параметрами его работы.

Регистрируемая ионограмма или ДЧХ представляют собой двумерную матрицу: 256 (количество отсчетов по высоте) на 400 (количество частот зондирования), в которой записаны слова (2 байта), определяющие уровень сигнала. Таким образом, для записи одной ионограммы потребуется около 200 кБ памяти в ОЗУ ПЭВМ и такое же количество для ее сохранения на магнитном носителе.

При цифровой регистрации амплитуд, погрешность отсчета высоты отражения сигнала может быть снижена до 2,5 км, в отличие от аналоговой регистрации, где погрешность составляет ~3-6 км, за исключением моментов времени при появлении на ионограммах сильно размытых следов, когда погрешность возрастает в несколько раз. Это связано с определением высоты отражения импульсного сигнала по регистрации его максимума, а не по нижней границе следа на аналоговой ионограмме. Дисперсию оценки высоты отражающего слоя можно определить как:

$$\sigma_n = c \cdot T_u / 2 \cdot \sqrt{Q},$$

где  $T_u$  - длительность колокольного импульса ( $\approx 50$  мкс),  $c$  - скорость света,  $Q$  - отношение сигнал/шум ( $\approx 10$ ). Подставив значения параметров в приведенную формулу, получим точность оценки  $\sigma_n \approx 2,5$  км.

Точность определения частотных параметров определяется шагом перестройки по частоте, то есть около 1 кГц.

Кроме того, качество цифровой ионограммы может быть улучшено с помощью повышения соотношения сигнал/шум, которое происходит при эквидистантном накоплении амплитуд отраженных сигналов для многократного зондирования ( $n$  раз) на одной частоте. Накопление позволяет уменьшить отношение сигнал-шум в  $\sqrt{n}$  раз.

В исследовательском режиме периодичность снятия ионограмм может быть доведена до 15сек., а также введена учащенная вдвое регистрация амплитуды сигнала в ограниченном высотном интервале.

Данный комплекс может быть также использован для регистрации уровня сигнала на фиксированной частоте зондирования в режиме излучения передатчиком немодулированной несущей. В этом случае задается рабочая частота зондирования, частота оцифровки сигнала и режим работы. Перед началом регистрации проводится предварительное исследование эфира на данной частоте зондирования и по его результатам автоматически выставляется динамический диапазон уровня сигнала приемного устройства. В памяти ЭВМ записывается амплитудно-временная регистрация сигнала объемом, равным 2,5 кБ.

## **6. Описание программного обеспечения ионозонда**

Программный пакет (ПП) "Циклон-Рапид" обладает большими функциональными и сервисными возможностями. Пакет предназначен для автоматического управления работой ионозонда, проверки его работоспособности, регистрации и обработки ионограмм в автоматическом и в интерактивном режимах, представления и сохранения полученных данных, в цифровых форматах, графическом и табличном видах, согласно рекомендациям инструкции URSI. Пакет программ оформлен в виде дружелюбного многооконного интерфейса, который объединяет ряд отдельных процедур, доступ к которым реализован через его основное меню. Общая структура ПП "Циклон-Рапид" представлена на рис.6.

По своему функциональному назначению в ПП входят следующие программные модули:

- Программа диспетчер (1) - осуществляет выбор режима работы ионозонда и вызов соответствующих процедур;

- Блок управления комплексом, содержит:

а) процедуру ввода параметров зондирования (2), которая осуществляет ввод, изменение и хранение параметров работы комплекса, а также автоматически изменяет необходимые параметры после очередного сеанса (дату и время зондирования, ослабление входного сигнала приемного устройства и т.д.);

б) процедуру управления работой комплекса (3), которая формирует управляющие сигналы комплекса, в соответствии с заданными параметрами зондирования;

в) процедуру первичной обработки и регистрации ионограммы (4), включающую в себя первичную обработку амплитудных реализаций, представление ионограммы на экране дисплея, сохранение ионограммы на диске в полном или усеченном (после первичной обработки) виде, при необходимости распечатку твердой копии на принтере.

- Блок обработки ионограмм, содержит:

а) процедуру выбора режима обработки (5), которая, на основе параметров, заложенных в программе диспетчер, определяет вариант обработки ионограммы;

б) процедуру автоматической обработки ионограммы (6), которая производит очистку ионограммы от помех, выделение и оцифровку следов отражения от разных слоев ионосферы, отсчет частотных и высотных параметров;

в) процедуру интерактивной обработки ионограммы (7), которая позволяет оператору с помощью курсора и мыши оцифровать следы отражения от разных слоев ионосферы и произвести отсчет частотных и высотных параметров;

г) процедуру регистрации ионосферных параметров (8), которая записывает в соответствующие файлы оцифрованные следы отражения, а также частотные и высотные параметры ионограммы.

- Блок контрольного просмотра ионограмм, содержит:

а) процедуру ввода ионограммы с диска (9), которая используется только в том случае, если есть необходимость переобработать с помощью процедур

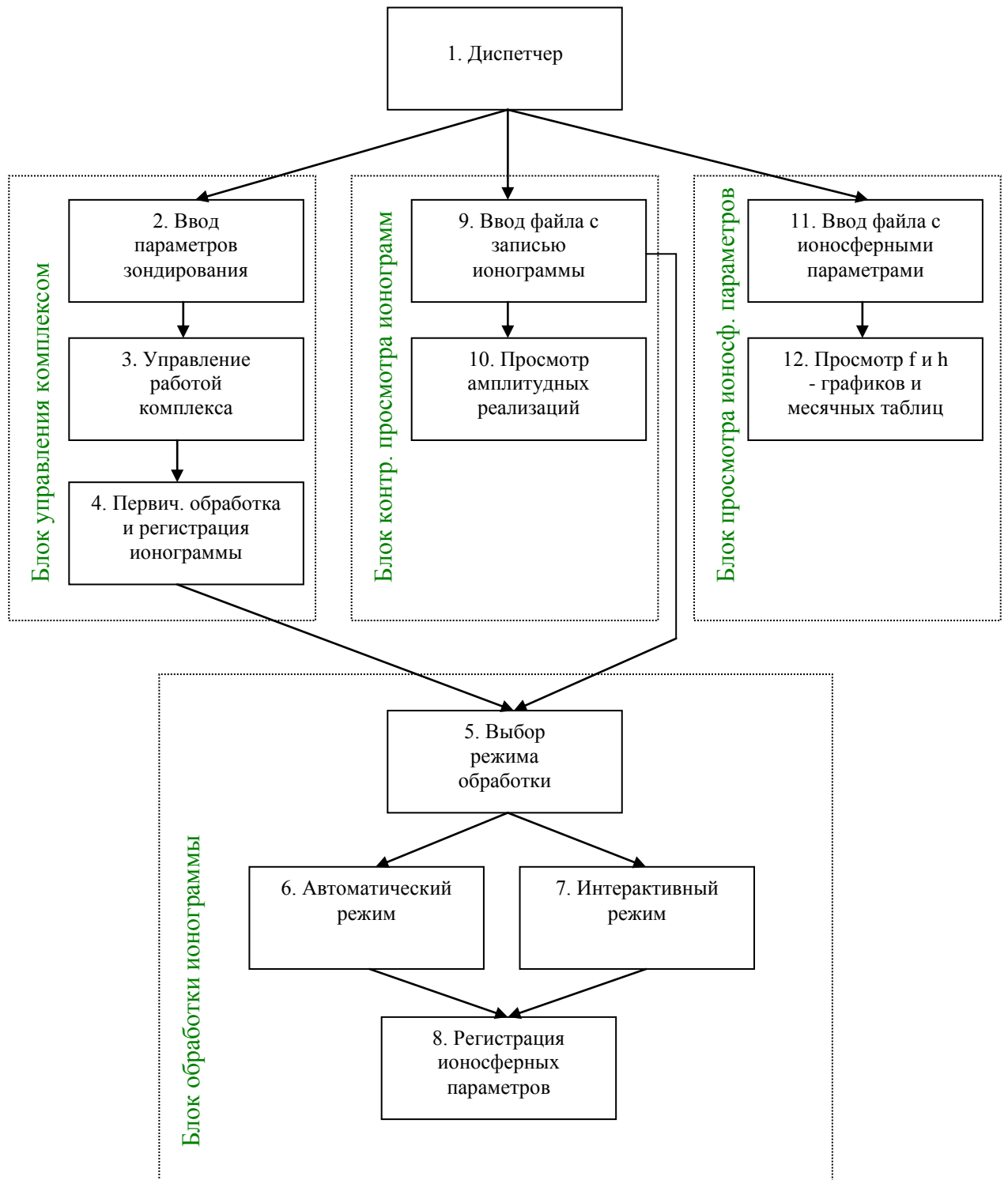


Рис. 6. Блок схема программного пакета "Циклон-Рапид".

(5-8) полученную ранее полную ионограмму;

б) процедуру просмотра амплитудных реализаций (10), эмулирующую режим контрольного осциллографа и позволяющую непосредственно наблюдать форму и амплитуду отраженных импульсов и шумов эфира, а также выводить на экран амплитудно-частотную характеристику для заданного высотного интервала.

- Блок просмотра ионосферных параметров, содержит:

а) процедуру ввода файлов с ионосферными параметрами (11), которые были получены в результате применения процедур (5-8);

б) процедуру просмотра f-графиков (12), которая позволяет представить файлы данных, наполненные результатами суточных наблюдений, в виде f и h графиков, месячных таблиц в форматах, рекомендованных URSI.

Необходимо отметить, что блок управления комплексом напрямую связан с аппаратной частью и может быть использован только в модификациях "Циклон". Другие блоки, в особенности блок обработки ионограмм, являются универсальными и могут быть рекомендованы для применения в других цифровых ионозондах. В частности, они были применены в ионозондах "Вертикаль-С" и "Бизон". Отметим, что программное обеспечение, используемое при обработке результатов зондирования для импульсных ионозондов, может быть полностью перенесено для использования в ЛЧМ-ионозондах.

Блоки программы 5, 6, 9 и 8 представлены в виде отдельного модуля *Cyclon.exe*., работа которого представлена ниже.

### **Работа с программой *Cyclon.exe*.**

1. Для того, чтобы загрузить изображение ионограммы, необходимо выбрать пункт меню «File/Open». Появится стандартное диалоговое окно открытия файлов Windows/ Вы можете загрузить исходный файл ионограммы формата \*.1?? или файл, сжатый архиватором zip. Если вы хо-

тите, чтобы в окне диалога отображались файлы только одного определенного формата, в выпадающем списке «Files of type» выберите нужный формат («Archive ionogram file», «Source ionogram file» или «Any file»).

2. После выбора файла должно появиться окно, содержащее требуемую ионограмму. При затруднении визуального определения ионосферных слоев можно попробовать изменить параметры отображения ионограммы при помощи параметров «View» и «Level». Отметим, что ионограммы, полученные при исправно действующей аппаратуре ионосферного комплекса «Cyclon-M» и нормальной ионосферной обстановке редко нуждаются в подобной коррекции. Для более четкой идентификации ионосферных слоев можно очистить ионограмму от шумов и выделить значимые отражения в автоматическом режиме, воспользовавшись кнопкой «Auto». Пример обработанной ионограммы показан на Рис.7.

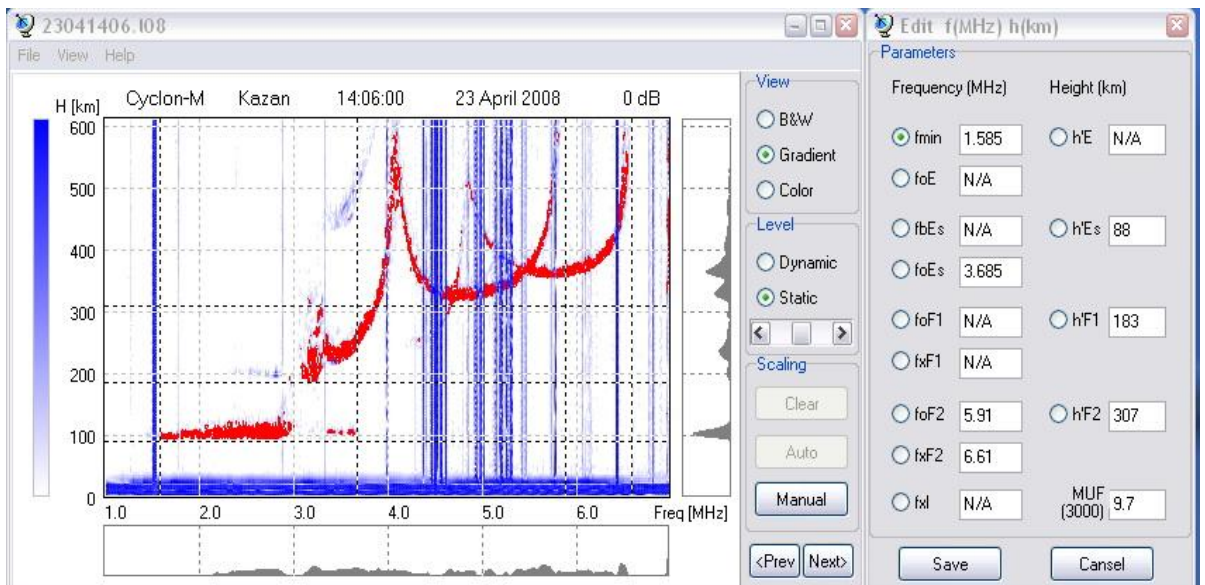


Рис 7. Общий вид окна ионограммы, обработанной в автоматическом режиме программой «Циклон-М»



3. После вывода ионограммы появляется возможность вычислить минимально применимую частоту (для расстояния 3000 км). При выборе режима «Manual» появляется окно редактирования ионосферных параметров, описанных выше. Для определения МПЧ необходимо отметить действующую высоту  $hF2$  и критическую частоту  $foF2$  для обыкновенной волны. Для этого необходимо выбрать в окне редактирования соответствующий параметр и, установив указатель мыши на требуемое значение, запомнить его, нажав на левую кнопку мыши. Получившиеся в итоге значение MUF(3000) будет автоматически отображены в соответствующем поле.
4. Для построения суточного хода ионосферных параметров (F-график) необходимо последовательно обработать все ионограммы за сутки, последовательно выбирая файлы при помощи кнопок «Next», «Previous» или в меню «File/Open», аккуратно отмечая и заполняя все значения параметров в поле редактирования «Edit». В результате в каталоге с суточными значениями ионограмм должен появиться текстовый файл с именем даты зондирования и расширением  $p??$ , где вместо символов «??» содержится год снятия ионограмм. Образец сохраненного таким образом текстового  $p$ -файла приведен в Таблице 1.

Таблица 2. Пример  $p$ -файла, содержащего ионосферные параметры обработанных ионограмм.

Time	fmin	fbEs	foEs	h'Es	foE	h'E	foF1	h'F1	fxF1	foF2	h'F2	fxF2	fI	dB
17:15:00	1.34	0.00	4.82	102.0	1.96	100.0	4.28	210.0	4.98	5.20	288.0	5.90	0.00	0
17:30:00	1.32	0.00	4.82	102.0	1.92	100.0	4.06	212.0	4.76	5.48	276.0	6.18	0.00	0
17:45:00	1.36	0.00	4.70	95.0	2.02	93.0	4.06	210.0	4.76	5.20	269.0	5.90	4.96	0

5. В случае монотонного ионосферного профиля можно восстановить истинные высоты по действующим с учетом магнитного поля или без не-

го по приведенным выше формулам. Для перевода действующих высот в истинные след волны на ионограмме необходимо аппроксимировать кривой, имеющей характерную логарифмическую особенность.

## **7. Порядок выполнения работы**

Задание №1.

Для предложенных преподавателем ионограмм определить критические частоты и действующие высоты для слоев E, F1 и F2, а также слоя Es.

Задание №2.

Вычислить значение МПЧ для дальности 3000 км. Предлагается для проверки, пользуясь вышеприведенными формулами самостоятельно рассчитать значение МПЧ и сравнить его со значением выдаваемым программой.

Задание №3.

Построить F-график для заданного периода. Построение суточного хода ионосферных параметров из полученного файла данных рекомендуется при помощи одного из современных математических пакетов, таких как «MathCad» или «MathLab».

Задание №4.

Необходимо «оцифровать» интересующий ионосферный след при помощи левой кнопки мыши, при нажатии на которой высвечивается текущее значение действующей высоты, частоты и амплитуды отраженного сигнала. Полученный ряд данных необходимо обработать по рекомендациям, приведенным выше и построить графики, воспользовавшись теми же математическими пакетами, что и в предыдущем задании.

## 1. Литература.

2. Галкин А.И., Ерофеев Н.М., Казимировский Э.С., Кокоуров В.Д. Ионосферные измерения. М.: Наука, 1971. 174 с.
3. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм. Пер с англ. под редакцией П.В. Медниковой. М.: Наука. 1977. 342 с.
4. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502с.
5. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М.: Наука, 1972. 563с.
6. Зыков Е.Ю., Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Автоматическая обработка ионограмм в ионосферном комплексе «Циклон-10» // Ионосферные исследования. М. 1997. N 50. С.232-243.
7. Минуллин Р.Г., Шерстюков О.Н., Сапаев А.Л., Назаренко В.И., Акчурин А.Д., Зыков Е.Ю. Цифровой ионосферный комплекс «Циклон-9». Казанский ун-т.-Казань, 1994. Рус.-Деп. в ВИНТИ. N 518-В94. 17.06.94.
8. Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д., Сапаев А.Н., Шерстюков О.Н. Автоматическая интерпретация ионограмм вертикального зондирования // Электронный журнал "Исследовано в России", 5, с. 52-64, 2007  
<http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2007/005.pdf>