

31. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДИКИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ИОНОГРАММ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯВЛЕНИЯ «КАЖУЩЕГОСЯ СЛОЯ F1», НАБЛЮДАВШЕГОСЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ «РАДАР-ПРОГРЕСС»

А.М. Веснин, К.Г. Ратовский

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Аннотация.

В результате эксперимента 25 сентября 2009 года, в ходе которого ТГК “Прогресс” включал двигательные установки (ДУ) пролетая на юго-западе от Иркутска, в ионограммах вертикального зондирования (ВЗ) ионозонда DPS-4 была обнаружена аномалия. Суть явления заключается в появлении «кажущегося слоя F1». Слои F2 и F1 являются регулярными образованиями в ионосфере. Слой F2 наблюдается всегда, а слой F1 – в освещенное время суток (время включения ДУ, так же как и анализируемый интервал наблюдения приходятся на освещенное время суток). На ионограммах высокочастотная граница слоя F2 проявляется в виде резкого роста кажущейся высоты отражения. Слой F1 на ионограммах проявляется в виде перегиба либо локального максимума ВЧХ, частота, соответствующая точке перегиба либо локального максимума является критической частотой F1. На ионограммах, полученных до появления аномалии критическая частота равна ~3.3 МГц, что является типичным для рассматриваемого сезона и времени суток. Далее наблюдается слой F1 с критической частотой 4.8 МГц. Скачкообразное изменение критической частоты, равно как и аномально большое значение для рассматриваемого сезона и времени суток, позволяют обозначить этот эффект как появление «кажущегося слоя F1».

В работе производится исследование обозначенного выше явления с помощью методики автоматической обработки ионограмм ВЗ. Анализ производится из предположения, что наблюдаемый эффект вызван ионосферными неоднородностями типа ВГВ.

Введение

Согласно современным представлениям крупномасштабные ионосферные неоднородности, как правило, обусловлены внутренними гравитационными волнами (ВГВ) [1]. В ионограммах вертикального зондирования ионозонда DPS-4 [2], полученных во время эксперимента «Радар-Прогресс» 25 сентября 2009 года, выявлены процессы возможно связанные с такой неоднородностью. В этой работе мы не можем утверждать, что наблюдаемое явление вызвано работой двигательных установок корабля, тем более, на данных полученных в другие сеансы включения ДУ такого эффекта не наблюдается. Исходя из предположения о существовании ВГВ, нами будет проверено, насколько выбранная нами модель возмущения удовлетворяет реальным физическим процессам. Так же планируется получить параметры возмущения.

1. Экспериментальные данные

Ионограмма представляет собой высотно-частотную матрицу амплитуд отраженных ионосферой сигналов, т.е. растровое изображение результата одного сеанса работы

ионозонда при вертикальном зондировании ионосферы. Ионограммы, охватывающие интересный период, представлены на рис. 1.

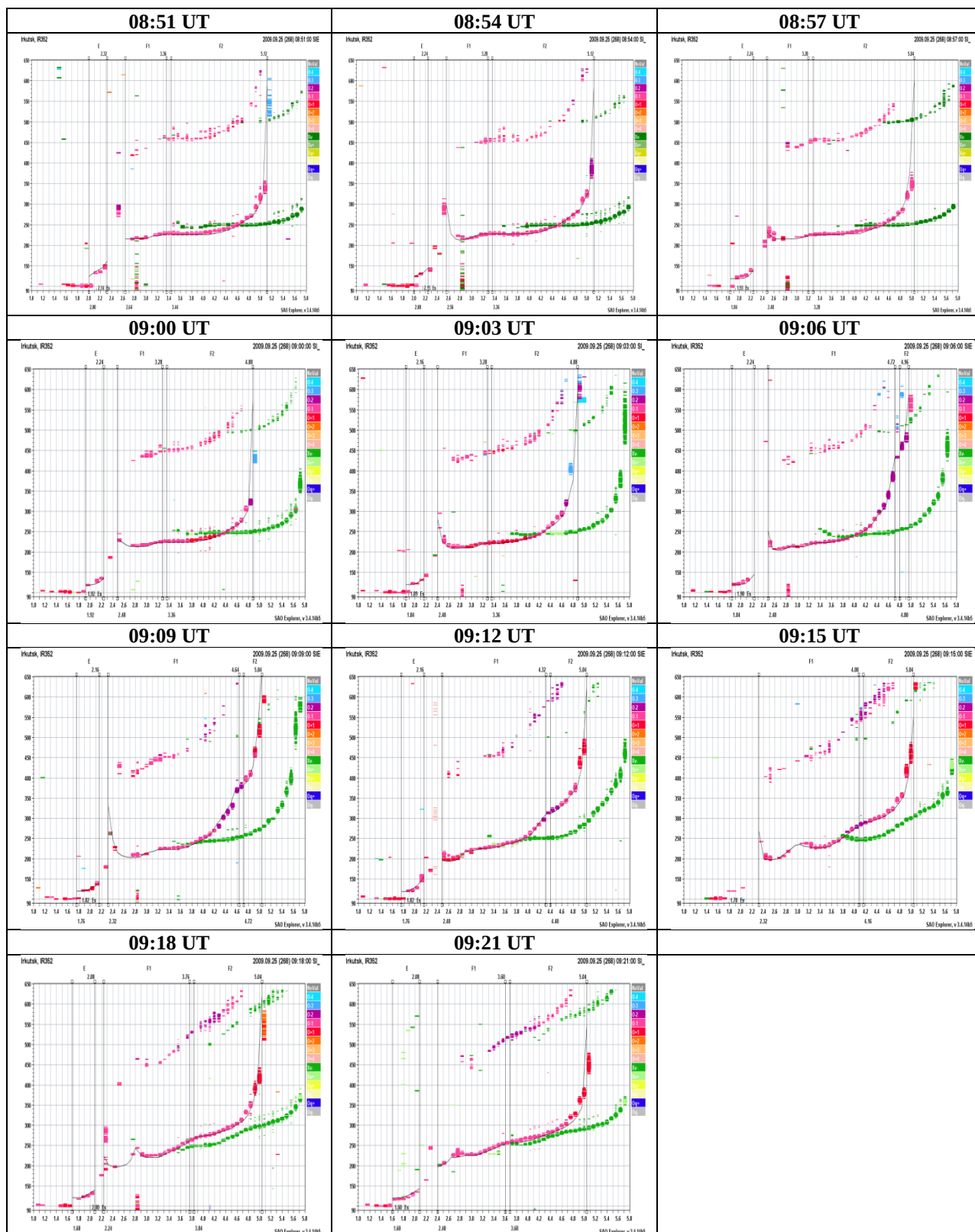


Рис. 1. Ионограммы, полученные 25.09.2009 с 08:51 до 09:21 UT.
Время включения ДУ 08:53:39 UT. Направление струй ДУ – на север.

След на ионограмме позволяет получить зависимость кажущейся высоты отраженного ионосферой сигнала от частоты зондирования или, другими словами, высотно-частотную характеристику (ВЧХ) ионосферного радиоканала. ВЧХ служит для восстановления высотного профиля электронной концентрации и представляет собой кривую в высотно-частотных координатах [3], [4].

Интересующий нас эффект наиболее явно можно наблюдать как перегиб на ионограммах с 9:06 по 9:15. В частности на ионограмме полученной в 9:12 он наблюдается на частоте 4,3 МГц, в то время как критическая частота регулярного слоя F1 наблюдается на 2,9 МГц. Менее явно эффект наблюдается начиная с 8:54 до 9:21, как уменьшение критической частоты F2 и увеличение действующей высоты отражения. Оба этих процесса говорят об уменьшении электронной концентрации, это позволило рассматривать только отрицательные возмущения. Анализ ионограмм так же показал, что необыкновенная составляющая отражения испытывает воздействия возмущения позже, чем обыкновенная, что указывает на то, что возмущение перемещается сверху вниз.

2. Описание методики

Методику обработки экспериментальных данных можно разбить на следующие этапы:

1. Определение базового профиля электронной концентрации (плазменной частоты)
2. Моделирование неоднородности на базовом профиле
3. Расчет ВЧХ по получившемуся профилю
4. Сравнение расчетной ВЧХ с ионограммой

Шаги 2-4 повторяются в цикле, где определяется наиболее подходящая ВЧХ.

Описанная выше методика реализована в виде компьютерной программы. Интерфейс позволяет искать параметры возмущения как в автоматическом, так и в ручном режиме.

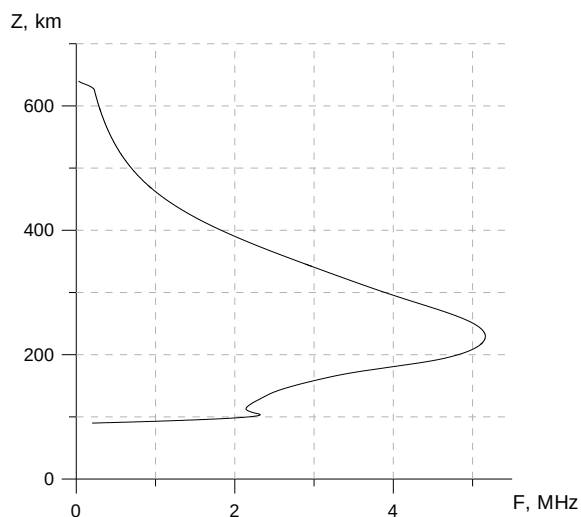


Рис. 2. Базовый профиль плазменной частоты

Базовый профиль был восстановлен из ионограммы, полученной в 08:51 UT. Выбор базового профиля обусловлен тем, что в это время состояние ионосферы можно было считать спокойным. Двигательные установки, если они и оказали какое-либо воздействие, включились только в 08:53:39 UT, следовательно, ионосфера не была еще подвержена искусственным воздействиям. Вид профиля изображен на рис. 2.

Неоднородность моделировалась как косинусообразная волна, амплитуда которой быстро спадает с удалением от центра:

$$NI(z) = 1 - A \exp\left(-\frac{(z - z_c)^2}{L^2}\right) \cos(k_z(z - z_c)) \quad (1)$$

A – относительная амплитуда возмущения,

z_c – центр возмущения,

k_z – волновое число ВГВ $k_z = \frac{2\pi}{\lambda}$, λ – длина волны,

L – масштаб затухания, L пропорционально длине волны. Такое определение позволяет просто определить, сколько длин волн будет укладываться в возмущении. Профиль возмущения представлен на рис. 3.

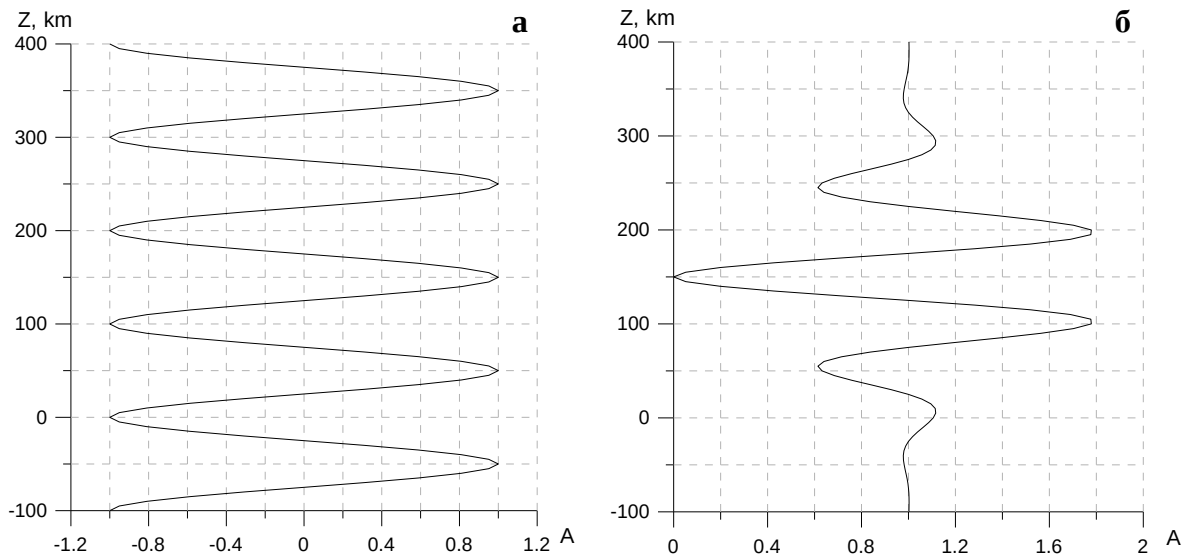


Рис. 3. Неоднородность а) косинусоида с длиной волны $\lambda = 100$ km, амплитудой $A = 1$ и центром $z_c = 150$ km; б) рассчитанная по формуле (1), параметр $L = \lambda$

Таким образом, пересчет точек базового профиля в точки профиля с возмущением выглядит следующим образом:

$$f_p(z) = f_{p0}(z)NI(z) \quad (2)$$

Параметры ВГВ – A , z_c , λ – перебирались в цикле. Диапазон и шаг перебора для каждого параметра представлены в табл. 1:

Параметр	Начальное значение	Конечное значение	Шаг
A	0,01	0,2	0,01
z_c , км	180	270	1
λ , км	150	250	4

Табл. 1. Диапазоны и шаги перебора параметров

ВЧХ восстанавливается как интеграл:

$$Hd = \int_0^{z_0} \frac{dz}{\sqrt{\varepsilon(z)}}$$

где $\varepsilon(z)$ определяется следующим известным выражением:

$$\varepsilon(z) = 1 - \frac{f_p^2(z)}{f^2}$$

f_p – плазменная частота дается выражением (2), f – частота зондирующего излучения, z_0 – высота отражения радиоволны [5].

Сравнение расчетной ВЧХ и экспериментальной ионограммы производилось следующим образом: в ионограмму вписывается ВЧХ, затем вдоль получившейся кривой суммируются амплитуды точек ионограммы. Математически это может быть представлено следующим образом:

$$S = \frac{1}{2} \left(s_n \frac{h_{n+2} - h}{\Delta h} + s_{n-1} \frac{h_{n+1} - h}{\Delta h} + s_{n+2} \frac{h - h_n}{\Delta h} + s_{n+1} \frac{h - h_{n-1}}{\Delta h} \right) \quad (3),$$

где S суммарная амплитуда «собранный» точкой ВЧХ на ионограмме на определенной частоте; s_{n-1} , s_n , s_{n+1} , s_{n+2} значения амплитуд точек ионограммы смежных по высоте с точкой ВЧХ на той же частоте; h – значение действующей высоты точки ВЧХ на определенной частоте; h_{n-1} , h_n , h_{n+1} , h_{n+2} , – точки ионограммы смежные с точкой ВЧХ снизу и сверху соответственно. На рис. 4 представлена графическая иллюстрация формулы (3). Квадратные точки – точки ионограммы, круглая – точка ВЧХ на этой же частоте.

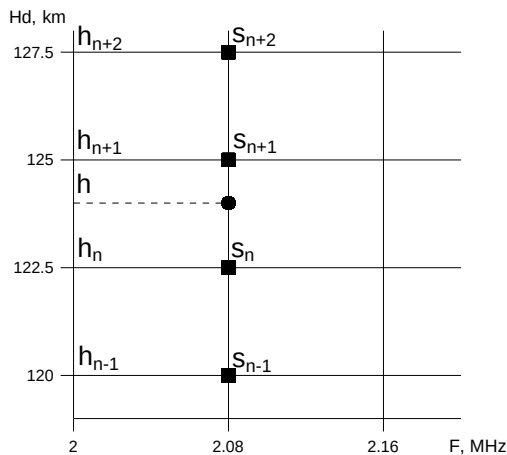


Рис. 4. Сравнение ВЧХ и ионограммы

При расчете ВЧХ из профиля электронной концентрации в выборе значений шага по частоте и начального значения частоты f нет ограничений, поэтому мы можем выбрать эти параметры таким образом, чтобы частотная сетка ВЧХ совпадала с частотной сеткой ионограммы. Следовательно, мы можем гарантировать, что картинка, изображенная на рис. 4, будет справедливой для любой частоты.

3. Результаты

Поиск параметров неоднородности производился только по обыкновенной составляющей отражения. Расчет производился для разных значений параметра L . Полученные значения параметров возмущения для разных значений затухания представлены в табл. 2, 3, 4.

Табл. 2. *Параметры возмущения. L соответствует тому, что в возмущение укладываются 4 длины волны.*

$L = \lambda$		8:54	8:57	9:00	9:03	9:06	9:09	9:12	9:15	9:18	9:21
	A	0,01	0,02	0,04	0,06	0,09	0,1	0,12	0,15	0,15	0,12
	λ	164	164	164	164	168	168	192	200	212	216
	z_c	240	235	228	218	216	212	202	192	186	185

Табл. 3. *Параметры возмущения. L соответствует тому, что в возмущение укладываются 2 длины волны.*

$L = \lambda/2$		8:54	8:57	9:00	9:03	9:06	9:09	9:12	9:15	9:18	9:21
	A	0,01	0,02	0,05	0,06	0,09	0,1	0,11	0,14	0,13	0,1
	λ	176	180	176	180	184	172	180	216	208	216
	z_c	241	238	237	217	215	212	205	193	190	190

Табл. 4. *Параметры возмущения. L соответствует тому, что в возмущение укладывается 1 длина волны.*

$L = \lambda/4$		8:54	8:57	9:00	9:03	9:06	9:09	9:12	9:15	9:18	9:21
	A	0,01	0,02	0,05	0,07	0,08	0,09	0,11	0,14	0,13	0,1
	λ	192	192	192	192	192	180	188	220	204	204
	z_c	238	234	235	217	218	215	206	197	194	194

Параметры представленные в табл. 2, 3, 4 описывают профили электронной концентрации, которые наиболее удовлетворяют экспериментальным данным, однако это не означает, что профили точно совпадают с этими данными. На рис. 5 представлены кривые, описывающие поведение каждого из параметров, представленных в табл. 2, 3, 4, а так же качества подбора ВЧХ.

Исходя из данных о перемещении центра неоднородности, можно утверждать, что

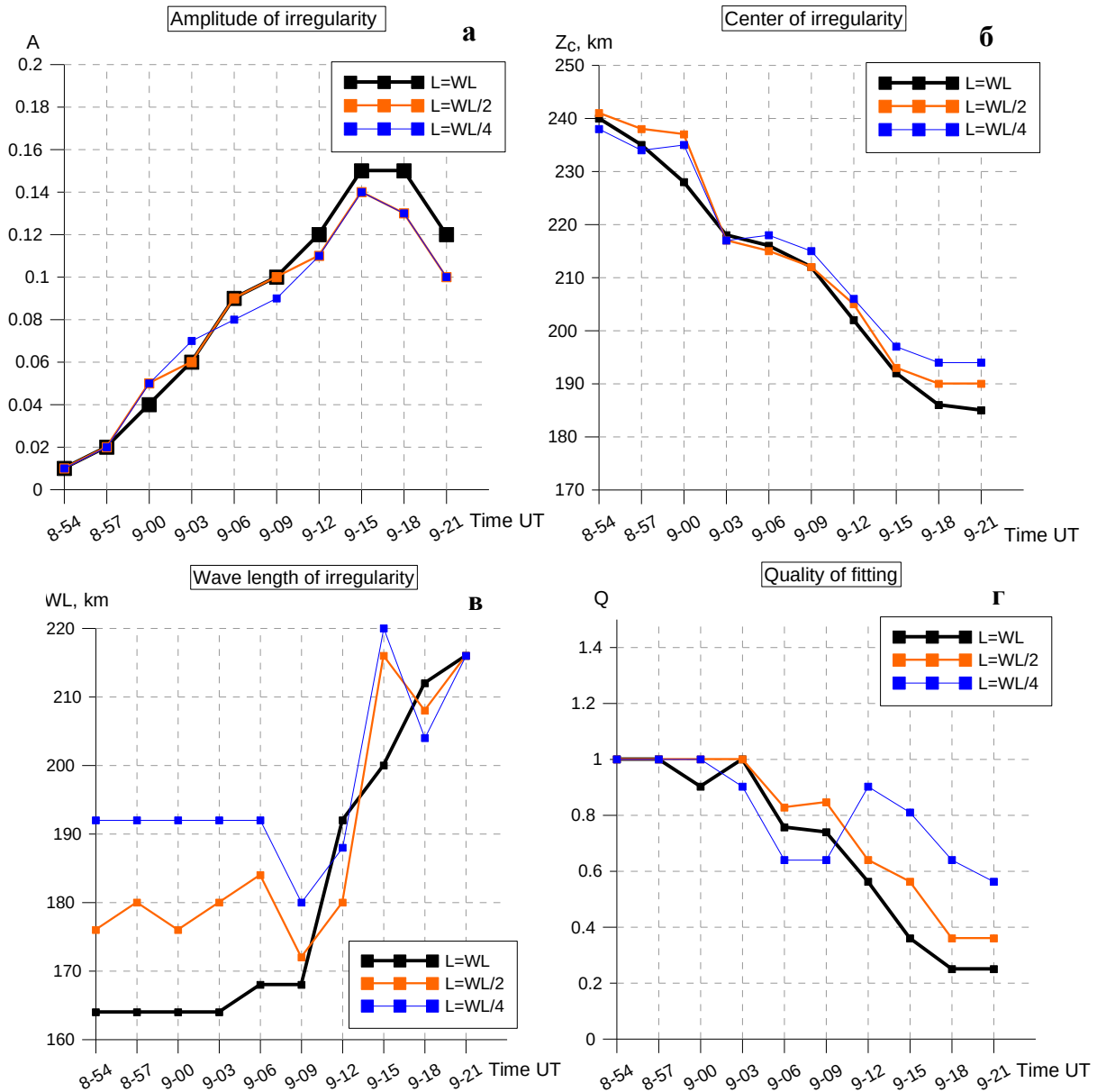
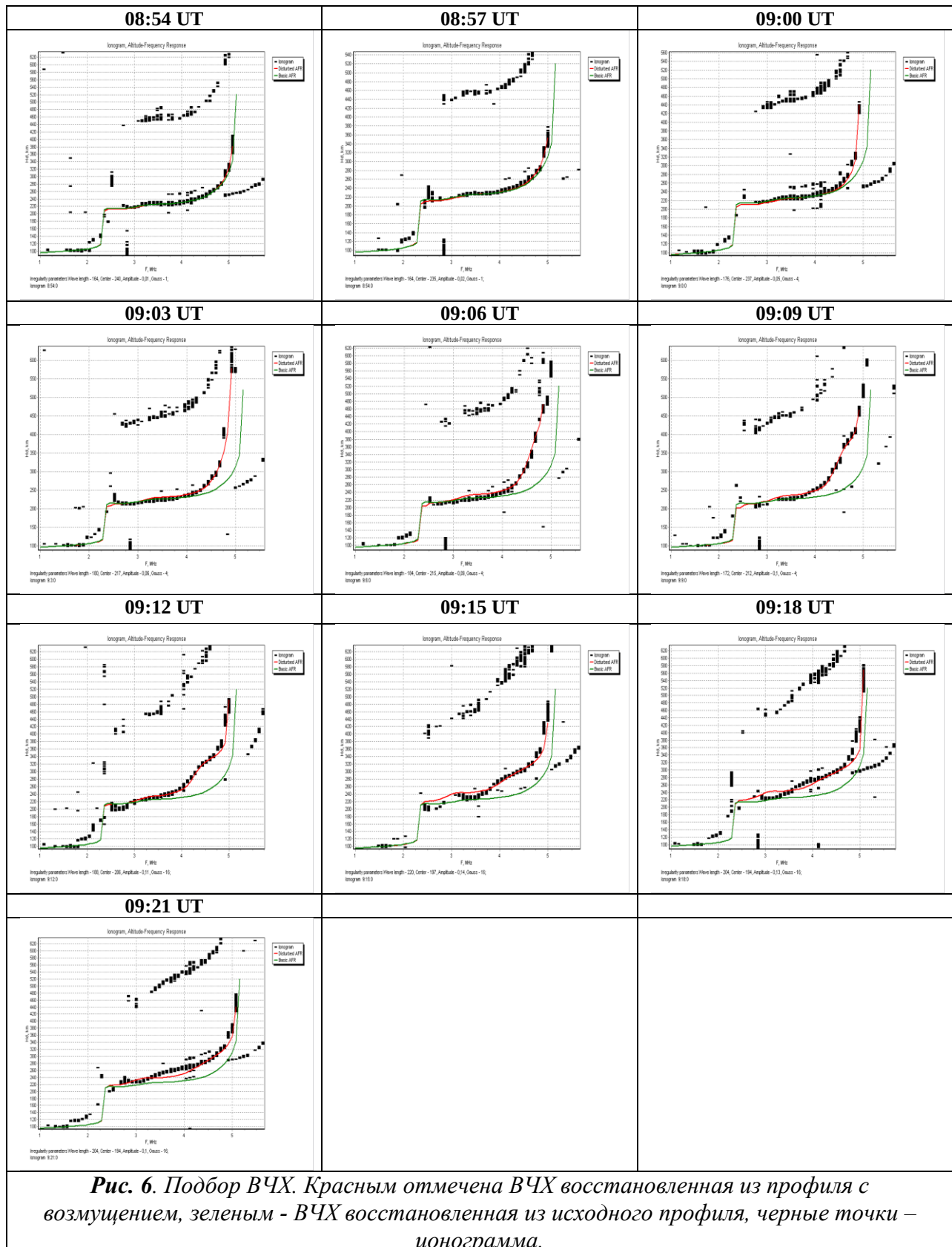


Рис. 5. Параметры возмущения (WL обозначает λ). а) амплитуды, б) центр, в) длина волны; г) качество подбора ВЧХ.

возмущение распространяется сверху вниз. Это вполне соответствует представлению о внутренних гравитационных волнах. Вертикальную составляющую скорости распространения можно оценить примерно в 31 м/с. Амплитуда возмущения сначала монотонно растет, затем происходит ее уменьшение. Кривые, описывающие изменение длины волны, не показывают монотонного роста или падения. Однако для данных, полученных с 8:54 до 9:12, значения длин волн можно, в рамках погрешности, считать постоянными, и для этого же периода модель возмущения хорошо согласуется с экспериментальными данными. Дальше, по-видимому, происходит выравнивание электронной концентрации, неоднородность «рассасывается», процессы, происходящие в

ионосфере, качественно изменяются, поэтому ионограммы, полученные с 9:15 до 9:21, хуже описываются предложенной формой возмущения. Визуально оценить качество подбора ВЧХ можно на рис. 6.



На рис. 5 г представлено качество подборки ВЧХ под ионограмму, т.е. степень корреляции расчетной ВЧХ с ионограммой. Из рис. 5 г можно сделать следующие выводы:

1. Возмущение, по всей видимости, «сужается» с течением времени. Таким образом, начальный этап развития возмущения лучше описывается формулой (1) с параметром $L = \lambda$, середина – параметром $L = \lambda/2$, конец – $L = \lambda/4$.
2. Как уже отмечалось выше, предложенная форма возмущения лучше описывает данные, полученные с 8:54 до 9:12, и хуже – данные, полученные с 9:15 до 9:21.

Для описания ионограмм, полученных с 9:15 до 9:21, следует подобрать другую форму возмущения, что планируется проделать в следующих работах.

Заключение

По результатам обработки и анализа полученных данных нельзя сказать, что предложенная форма возмущения, а именно – быстро затухающая косинусообразная волна, полностью определяет процессы, протекающие в ионосфере. Однако большая часть данных, включающих в себя начало и середину жизни возмущения, хорошо описывается предложенной моделью. Было установлено, что распространение неоднородности направлено сверху вниз, что соответствует современным представлениям о ВГВ. Были оценены параметры возмущения и получены их численные значения.

Планируется в дальнейшем развивать методику, в частности будут опробованы новые формы возмущения.

Настоящая работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 08-05-00274.

Литература

1. Hocke, K., Schlegel, K. A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995. *Annales Geophysicae*, 14(9), 917–940, 1996.
2. Ратовский К.Г. Степанов А.Е. Исследования ионосферы в северо-восточном регионе России с помощью цифровых ионозондов DPS-4 // Труды XXII Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн»: Ростов-на-Дону. Т. 1. С.173-176. 2008.
3. Reinisch B. W., Huang X. Automatic Calculation of Electron Density Profiles from Digital Ionograms, 3, Processing of Bottomside Ionograms// *Radio Sci.* – 1983. – V.18. N3. – P. 477-492.
4. Reinisch, B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. et al. Automated collection and dissemination of ionospheric data from the digisonde network// *Adv. Radio Sci.* – 2004. – V.2. – P. 241-247.
5. Альперт Я.Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. М., Наука, 1972. – 563 с.