

**Министерство образования Российской Федерации  
Научно-исследовательский радиофизический институт  
(НИРФИ)**

**Препринт № 475**

**Формирование и динамика  
спорадических слоев ионизации  
в E-области ионосферы в заходно-восходные часы  
по наблюдениям методом  
резонансного рассеяния радиоволн  
на искусственных периодических неоднородностях  
ионосферной плазмы**

**Н. В. Бахметьева  
В. В. Беликович  
Л.М. Каган  
А.А. Понятов**

**Нижний Новгород  
2003**

Н. В. Бахметьева, В. В. Беликович, Л.М. Каган, А.А. Понятов

## ФОРМИРОВАНИЕ И ДИНАМИКА СПОРАДИЧЕСКИХ СЛОЕВ ИОНИЗАЦИИ В Е-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ В ЗАХОДНО-ВОСХОДНЫЕ ЧАСЫ ПО НАБЛЮДЕНИЯМ МЕТОДОМ РЕЗОНАНСНОГО РАССЕЯНИЯ РАДИОВОЛН НА ИСКУССТВЕННЫХ ПЕРИОДИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЯХ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ

Препринт № 475.–Нижний Новгород: НИРФИ, 2003,–28 с.

УДК 551.510.535

Приведены новые результаты исследований спорадических слоев ионизации в нижней ионосфере по наблюдениям в заходно-восходные часы в летние месяцы 2000, 2001 гг. Измерения выполнены на нагревом комплексе «Сура» (НИРФИ, г.Нижний Новгород). Наблюдения проводились 16,17 августа 2000 г. и 15,16 июня 2001 г. в вечерние и ночные часы с высотным разрешением 1,4 км и цифровой регистрацией квадратурных компонент сигнала, рассеянного ИПН. Получено, что амплитуда рассеянного сигнала определяется интерференцией волн от ИПН и различных ионосферных образований, включая спорадические слои и крупномасштабные естественные неоднородности. На основе анализа высотно-временной зависимости амплитуды, времени релаксации и фазы рассеянного сигнала получены новые сведения о формировании и динамике среднеширотного спорадического слоя E ( $E_s$ ) в вечерние и ночные часы, приведены результаты измерения скорости вертикального движения плазмы, сделаны оценки массы металлических ионов, сгонка которых за счет механизма ветрового сдвига могла привести к образованию наблюдавшихся спорадических слоев.

## Введение

В работе [1] приведены результаты исследования неоднородной структуры нижней ионосферы методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы (ИПН), полученные по данным измерений в дневные часы в августе 1999 г. В частности, в [1] получены и проанализированы яркие записи рассеянного сигнала, высотные профили и временные зависимости его амплитуды и времени релаксации, исследованы высотно-временные вариации температуры и плотности атмосферы, скорости вертикального движения плазмы и вертикальной компоненты турбулентной скорости. Получены новые сведения о рассеянии радиоволн на ИПН, идентифицированы различные ионосферные образования, включая спорадические слои и крупномасштабные ионосферные неоднородности, проанализирована динамика этих неоднородностей, высоты их появления и временные характеристики. Было показано, в частности, что амплитуда рассеянного сигнала во многих случаях определяется интерференцией волн от ИПН и естественных ионосферных образований, что вызывает быстрые вариации и определенные особенности в высотной зависимости амплитуды и времени релаксации сигнала.

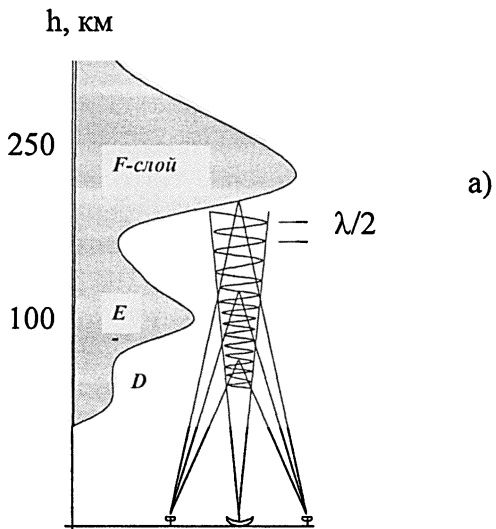
Эксперименты были продолжены в 2000, 2001 гг. в вечерние и ночные часы, включавшие периоды захода и восхода Солнца, а именно с  $19^{00}$  до  $5^{00}$  LT (местного времени) 16,17 августа 2000 г. (с перерывом с  $22^{30}$  до  $2^{30}$ ) и 15,16 июня 2001 г. с  $18^{30}$  до  $5^{30}$  LT. Заметим, что согласно многолетним ионосферным наблюдениям, проводимым различными методами, на июнь в северном полушарии приходится главный максимум вероятности появления спорадического слоя E [2], а в целом 80 % отражений от  $E_s$  регистрируется в течение года с мая по август. Задачей экспериментов 2000 г. было исследование методом ИПН ночной ионизации D- и E-областей, включая спорадические слои. Одним из полученных результатов было наблюдение сигналов, рассеянных ИПН, от E-области с максимальной амплитудой до 50 дБ после захода Солнца на этих высотах и появление их в довосходные часы. Можно было предположить, что сигналы, рассеянные ИПН, а значит, и ионизация E-области существовали в течение всей ночи (об этом сообщалось в [3]). Другим результатом, полученным на основе анализа ярких записей амплитуды и фазы рассеянного сигнала, был вывод о том, что в восходно-заходные часы спорадические образования различных про-

странственно-временных масштабов наблюдаются в верхней части D-области и нижней части E-области практически постоянно. По данным наблюдений 2000 г. отражения от этих слоев могли быть относительно «гладкими», а могли иметь и выраженную «облачную» структуру. Результаты оказались интересными, и в июне 2001 г. эксперимент был повторен, а наблюдения продолжались практически всю ночь. Совместные результаты этих двух экспериментов представлены в настоящей работе.

### 1. Постановка эксперимента

Напомним, что метод, использующий ИПН, основан на создании в ионосфере искусственных периодических неоднородностей электронной концентрации в поле мощной стоячей волны от наземного радиопередатчика, локации ИПН пробными (то есть слабыми, не возмущающими среду распространения) радиоволнами и измерении амплитуды и фазы обратно рассеянного сигнала. Суть метода заключается в том, что в поле мощной стоячей радиоволны, образующейся в результате интерференции падающей на ионосферу и отраженной от нее волн, возникают искусственные периодические неоднородности ионосферной плазмы. В пучностях стоячей волны происходит нагрев электронного газа, в результате чего образуется периодическая структура с пространственным периодом, равным половине длины мощной радиоволны  $\lambda$  (см. рис. 1а). Температурные неоднородности, в свою очередь, формируют неоднородности электронной концентрации. Процессы образования и релаксации ИПН после выключения нагрева в каждой области ионосферы определяются различными физическими процессами: изменениями состава, плотности, температуры атмосферы, степени диссоциации и ионизации с высотой, что позволяет применять этот метод для диагностики ионосферы. Метод резонансного рассеяния на ИПН позволяет регистрировать сигналы от сравнительно слабых неоднородностей (при относительной концентрации меньше  $10^2$ ).

В описываемых экспериментах для создания ИПН использовался стенд "Сура" с координатами 56,1°N, 46,1°E: две секции в 2000 г. и три секции в 2001 г., при этом эффективная мощность излучения составила ~70 и 170 МВт соответственно. Каждый сеанс продолжался 20 секунд, из них в течение первых 3 секунд осуществлялся нагрев ионосферы радиоволной X-поляризации на частоте  $f=5,67$  МГц. За трехсекундным нагревом следовала пауза длительностью 17 секунд, в первые



Нагрев ионосферы,  
образование ИПН

Диагностика ИПН



Рис. 1. Схемы: а) создания в ионосфере искусственных периодических неоднородностей ионосферной плазмы, б) режим нагрева и диагностики ИПН.

4 секунды которой излучались пробные импульсы той же частоты длительностью 25 мкс и частотой повторения 50 Гц (рис. 16). Рассеянные сигналы принимались антенной, состоящей из 12 синфазных диполей на каждой линейной поляризации и выделяющей необыкновенную компоненту. Усиление сигналов осуществлялось приемником с полосой пропускания 40 кГц. Квадратурные компоненты рассеянного сигнала регистрировались в цифровом виде с шагом по высоте 1,4 км и кодировались 12-и разрядным АЦП. Далее на каждой высоте рассчитывались амплитуда и фаза сигнала, временные зависимости которых затем аппроксимировались линейными функциями вида  $\ln A(t) = \ln A_0 - \frac{t}{\tau}$  и  $\varphi(t) = \varphi_0 + \frac{4\pi Vt}{\lambda}$ . В этих выражениях  $\lambda$ —длина пробной (зондирующей) волны в плазме,  $\tau$ —время релаксации сигнала, рассеянного ИПН, которое характеризует время жизни искусственных неоднородностей после прекращения нагрева,  $V$ —скорость их вертикального движения (более подробно см. [4]). Уровень естественных шумов в разное время наблюдений составлял 10–15 дБ, хотя были периоды с интенсивными импульсными помехами. Сканирование проводилось от высоты 50 км до высоты отражения мощной радиоволны. В настоящей работе все результаты приведены для нижней ионосферы, то есть для интервала высот 50–130 км. Для контроля общего состояния ионосферы каждые 15 минут снимались ионограммы вертикального зондирования.

## 2. Амплитуда и время релаксации рассеянного сигнала

### 2.1. Результаты наблюдений 16,17 августа 2000г.

На рис. 2 представлены: а) яркостная запись амплитуды рассеянного сигнала, б) времени релаксации и в) скорости вертикального движения плазмы. Здесь же светлой линией показана зависимость от высоты времени захода (левая панель) и восхода (правая панель) Солнца на высотах ионосферы. Данные по амплитуде  $A$  и скорости вертикального движения  $V$  представлены в первоначальном виде без последующей обработки, а значения времени релаксации  $\tau$  сглажены по высоте в интервале 2,8 км и пятиминутному интервалу времени. Отрицательные значения  $V$  соответствуют движению вверх. На рис. 2 видны сигналы от ИПН в D- и E-областях – на высотах 56–80 км и 84–115 км, соответственно.

Вначале несколько слов о сигналах от ИПН в D-области ионосферы. Достаточно слабые сигналы наблюдались еще около часа после

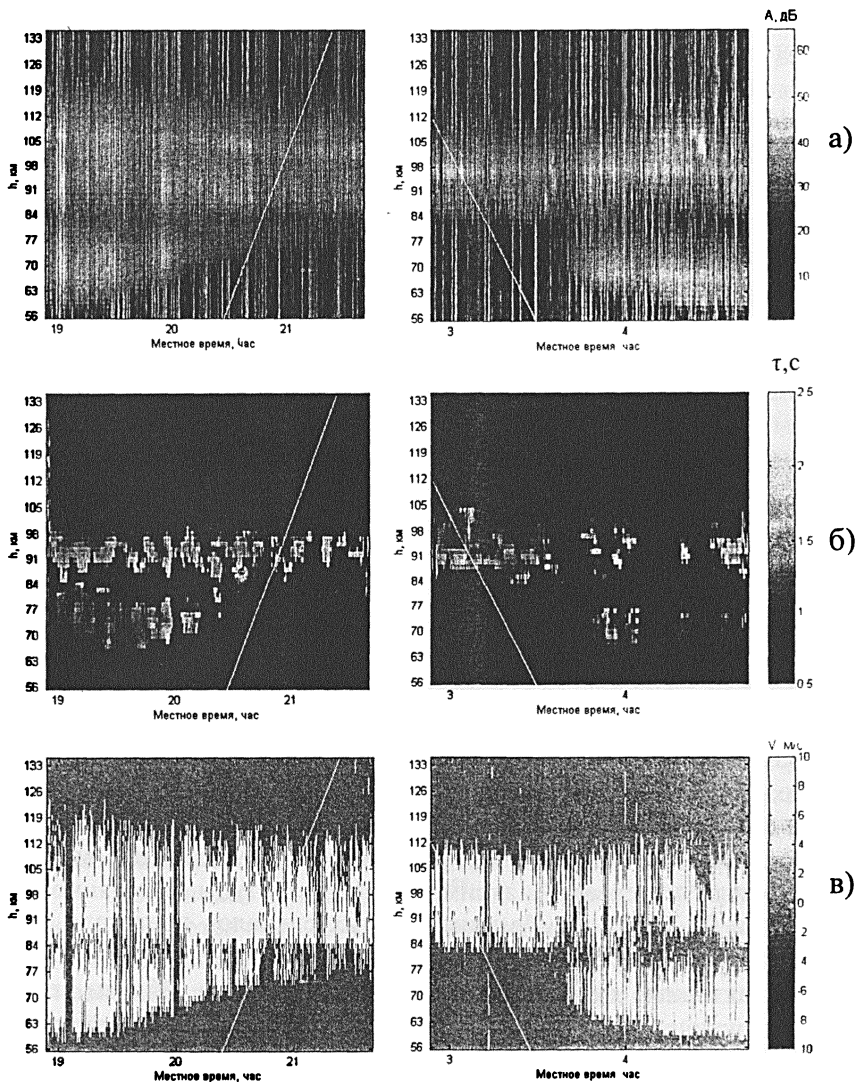


Рис. 2. Яркостные записи (высотно-временные зависимости) рассеянного сигнала для 16,17 августа 2000 г.: а) амплитуды, б) времени релаксации, в) скорости вертикального движения.

захода Солнца на этих высотах, затем исчезали и появились приблизительно через 30 минут после восхода. Обращает на себя внимание явление, определенное в [5] как заходно-восходная асимметрия высотно-временной зависимости рассеянного сигнала. Она выражается, в частности, в том, что на заходе Солнца сигналы от ИПН имеют большую амплитуду и занимают больший интервал высот, чем на восходе, что хорошо видно на рис. 2. Интервал высот между D- и E-областями, в котором рассеянные сигналы отсутствовали, достигал 7 км в дозакходные часы и 15 км после восхода Солнца. В [3] на основе качественных рассуждений и численных расчетов времени релаксации и амплитуды рассеянного сигнала по модели аэрономических процессов с одним отрицательным ионом показано, что эти особенности обусловлены увеличением скорости отлипания электронов вследствие повышенной концентрации атомарного кислорода. Отметим, что в D-области главную роль в процессе образования ИПН играет температурная зависимость коэффициента прилипания электронов к нейтральным молекулам [4].

По данным ионозонда критические частоты E-области составили 2,0–2,5 МГц. На ионограммах виден полупрозрачный  $E_s$  с частотой экранирования  $f_b=1,5-3$  МГц и предельной частотой отражения  $f_o=1,5-5$  МГц. Сигналы от ИПН в E-области наблюдались в течение всего периода измерений. На яркостных записях каждого отдельного сеанса видны также спорадические сигналы характерного вида. Так как на ионограммах в это время наблюдался  $E_s$ , эти сигналы можно идентифицировать как рассеяние на неоднородностях полупрозрачного спорадического слоя E. На левой панели рис. 2а) хорошо видны два выделенных высотных интервала максимальной амплитуды рассеянного сигнала: вблизи 92 и 106 км. Амплитуда этих сигналов достигала 55 дБ, а значения времени релаксации значительно превышали (до 5 раз) величины, характерные для ИПН в E-области (0,5–2,5 с). Вблизи первой высоты практически все время существовал ярко выраженный тонкий слой ионизации, который часто имел «облачную» структуру. Характерные примеры спорадических слоев с «облачной» структурой приведены на рис.3. Амплитуда сигнала в центре «облака» могла быть на 10–40 дБ выше, чем по краям. Временная протяженность «облаков», как правило, составляла 0,5–2,0 с.

Выше 96 км отражения от нижнего слоя плавно переходили в отражения от E-области, а ниже – на высотах 80–86 км наблюдались,



по-видимому, сигналы от естественных крупномасштабных неоднородностей, так называемые сигналы частичных отражений. Кроме того, почти всегда наблюдались сигналы от  $E_s$  с высот 105–108 км, то есть максимум  $E_s$  находился на высоте максимума слоя E. Кроме того, эпизодически появлялся и верхний спорадический слой на высоте  $h \sim 116$  км, часто также с выраженной «облачной» структурой (см. рис. 2 и 3в). С течением времени отражения от E-области переместились на более низкие высоты. Из рис. 2 видно, что за ночные часы слой E снизился приблизительно на 5 км. С восходом Солнца в E-области высота слоя начала постепенно возрастать.

## 2.2. Результаты наблюдений 15,16 июня 2001г.

В 2001 г. измерения характеристик сигналов ИПН проводилась всю ночь с 15 на 16 июня. Яркостные записи амплитуды, времени релаксации сигналов и скорости вертикального движения плазмы для этого дня наблюдений представлены на рис. 4а–в). На рис. 4г) показан временной ход частоты экранирования слоя  $f_b$  и предельной частоты отражения  $f_o$ , а также критических частот областей E и F2.

Эти наблюдения подтвердили отмеченную в предыдущем эксперименте заходно-восходную асимметрию высотно-временной зависимости рассеянного сигнала. Слабые сигналы ИПН от D-области наблюдались почти до захода Солнца на этих высотах, а появились спустя час после восхода. Их амплитуда была в целом выше в восходные часы. Высотный интервал, который занимали сигналы от ИПН в D-области и интервал высот между D- и E-областями, в котором сигналы отсутствовали, соответствует наблюдениям 2000 г.

По данным ионозонда с 19<sup>45</sup> LT 15 июня до 3<sup>15</sup> 16 июня наблюдался полупрозрачный  $E_s$  с частотой экранирования  $f_b=3,0-5,5$  МГц и предельной частотой отражения  $f_o=5-10$  МГц, в результате чего регистрировалось до 5 кратных отражений от  $E_s$  как на ионограммах, так и по регистрации ИПН.

Интересной особенностью эксперимента 2001 г. явилось наблюдение нескольких типов спорадических образований на высотах E-области. Первый тип можно определить как «классический» долгоживущий  $E_s$ , сформировавшийся на высотах 95–105 км (это высота максимального значения амплитуды сигнала от слоя), с «толщиной» (по уменьшению амплитуды рассеянного сигнала в 2 раза) до 5 км. Ампли-

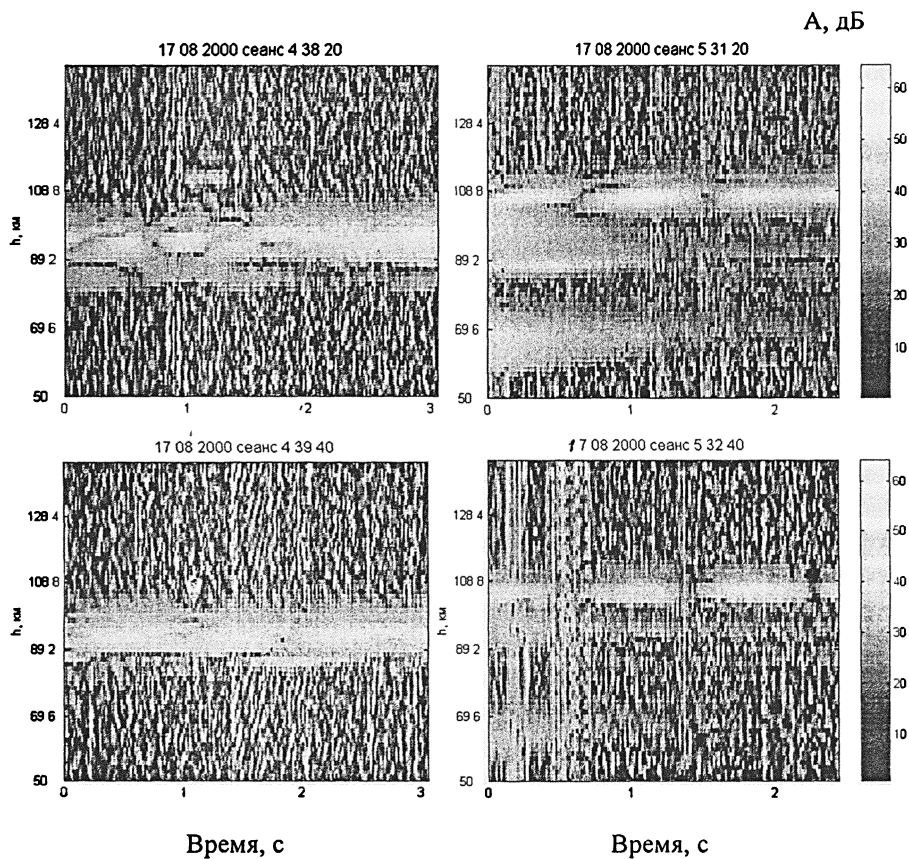


Рис. 3. Пример спорадического слоя E с выраженной «облачной» структурой – подслоного (левые панели) и возникшего выше максимума E-области (правые панели).

туда рассеянного ИПН сигнала от такого слоя составляла до 70 дБ, а время релаксации до 10 с.

Второй тип спорадического образования можно назвать подслоиным  $E_s$  (underlying). Этот, как правило, тонкий слой обычно наблюдался на высоте 85–90 км и часто имел ярко выраженную «облачную» структуру. Амплитуда рассеянного ИПН сигнала от такого слоя составила до 75 дБ, его время релаксации – до 7–10 с.

И, наконец, третий тип спорадического слоя – промежуточный (sequential) или спускающийся  $E_s$ . Подобные слои периодически наблюдаются разными исследователями (см., например, [2,5,6]). Это был достаточно толстый слой – «толщиной» до 10 км с амплитудой рассеянного сигнала более 75 дБ и временем релаксации более 10 с. Он появился на ионограммах 15 июня 2001 г. в 19<sup>45</sup> LT, методом ИПН зарегистрирован в это же время. Слой появился в области высот 113–123 км, постепенно снижаясь до высот 100–113 км с эффективной скоростью ~1 м/с. Волнообразная модуляция спускающегося слоя хорошо видна на рис. 3а). В интервале 21<sup>00</sup>–22<sup>00</sup> пропущено 8 минут по техническим причинам, поэтому после 21<sup>00</sup> шкала времени немного сдвинута влево.

На графике зависимости критических частот слоя  $E_s$  от времени (рис. 4г) видно, что после 21<sup>00</sup> частоты  $f_b$  и  $f_o$  начинают возрастать и за 45 минут увеличиваются почти в 2 раза:  $f_o$  растет с 4,8 до 10 МГц, а  $f_b$  – с 3,4 до 5,3 МГц, достигая максимума в 21<sup>45</sup>, после чего частоты  $E_s$  начинают быстро уменьшаться, и в 22<sup>00</sup> LT наблюдается их глубокий минимум. На рис. 4а) этот интервал времени соответствует резкому уменьшению амплитуды рассеянного сигнала и «расслоению» верхнего спускающегося  $E_s$  на два более тонких слоя. Аналогичная ситуация имела место и с 20<sup>20</sup> до 20<sup>40</sup>, когда амплитуда отражений слоя упала с 70 до 40–50 дБ, а его «толщина» уменьшилась до 2–3 км. Интересно, что в это же время наблюдался небольшой рост  $f_b$  и небольшой локальный максимум  $f_o E_s$ . Что касается слоя F2, то амплитуда сигнала, рассеянного ИПН, была стабильно высокой (всегда более 75 дБ, то есть намного превышала динамический диапазон приемника), критическая частота слоя слабо менялась около 7 МГц, наблюдалась лишь небольшая вариация  $f_o F2$  (до 1 МГц) с 21<sup>45</sup> до 1<sup>00</sup> LT. Любопытно, что в течение почти часового интервала времени с 0<sup>45</sup> до 1<sup>30</sup> LT на записях зарегистрирован только сигнал от ИПН в F2-области и «следы» от его многочисленных кратных отражений (широкая вертикальная полоса на рис. 4а). Не смотря на то, что на ионограммах в это время виден  $E_s$  с

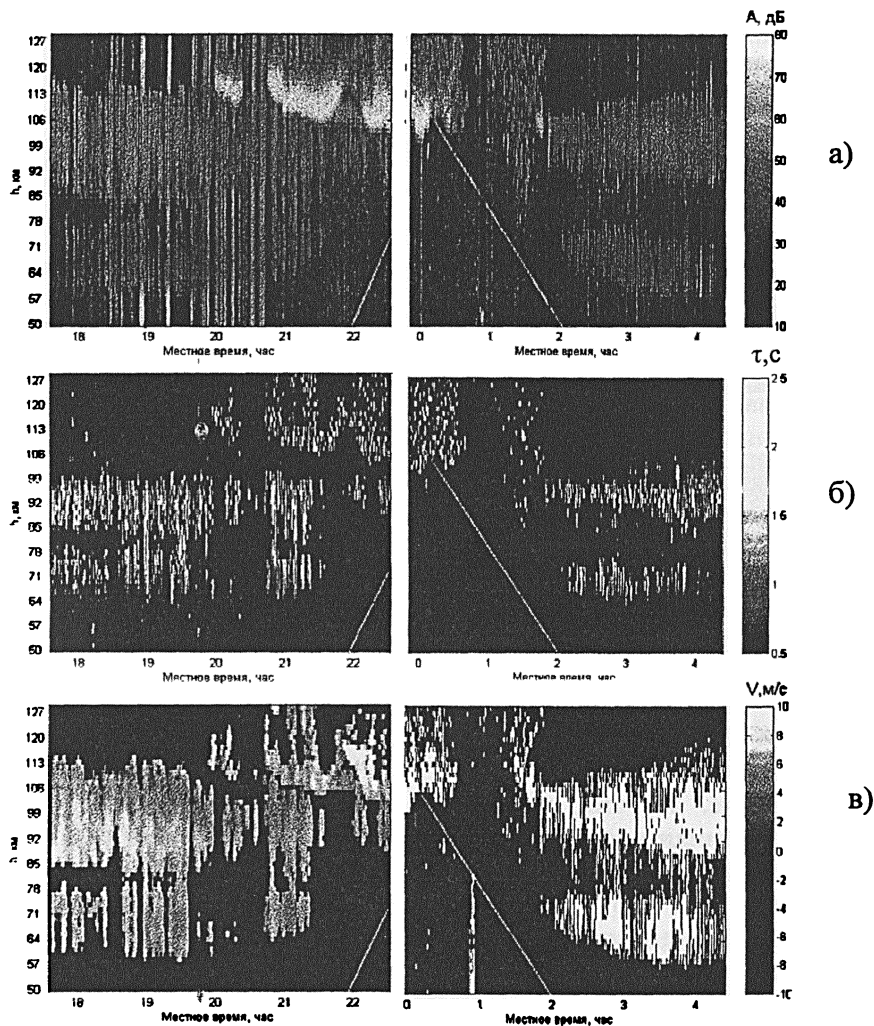


Рис. 4. Высотно-временные зависимости рассеянного сигнала для 15,16 июня 2001 г.: а) амплитуды, б) времени релаксации, в) скорости вертикального движения плазмы.

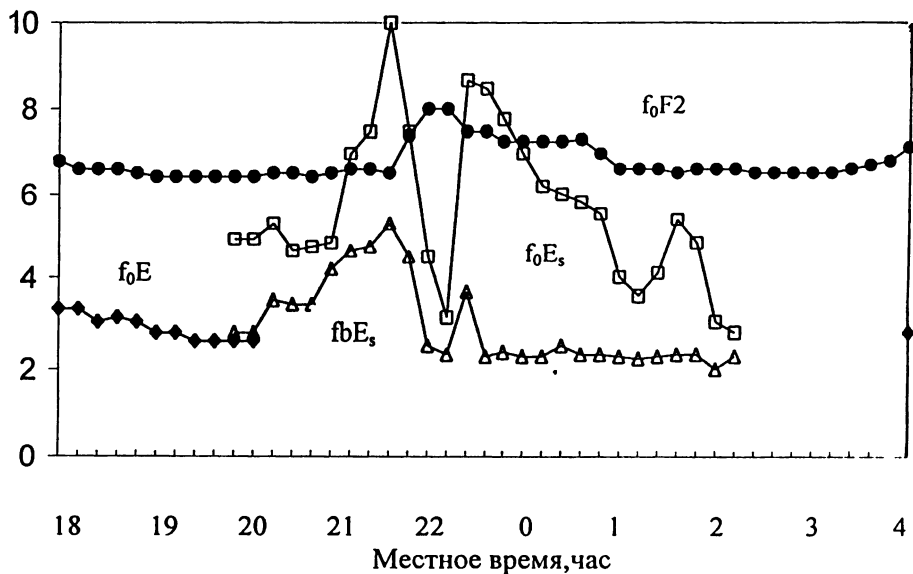


Рис. 4.(продолжение): г) критические частоты спорадического слоя E  $fbE_s$ ,  $f_0E_s$ , областей E и F2  $f_0E$  и  $f_0F2$ .

предельной частотой отражения  $f_oE_s=3-5$  МГц и частотой экранирования  $f_bE_s=2,5$  МГц, методом ИПН он регистрировался лишь эпизодически. Этот факт пока не удалось объяснить. Приблизительно в 1<sup>30</sup> появились рассеянные сигналы от  $E_s$  вблизи высоты 116–113 км, и практически одновременно появились сигналы от ИПН в Е-области. Они регистрировались до конца наблюдений, причем одновременно на ярких записях видны отражения от  $E_s$  с высоты чуть ниже высоты максимума Е-слоя. На восходе Солнца реже наблюдался подслонный тип  $E_s$ , а слой «классического» типа регистрировался практически до конца наблюдений. Таким образом, сигналы ИПН от Е-области наблюдались не всю ночь и были зарегистрированы лишь спустя полтора часа после восхода Солнца на этих высотах.

### 3. Скорость вертикального движения плазмы.

#### Динамика спорадических образований

В монографии [4] подробно обсуждается тот факт, что в процессе своей релаксации ИПН увлекаются движением нейтрального газа, поэтому регистрация доплеровского смещения частоты рассеянного сигнала может быть использована для определения скорости вертикального движения плазмы. На высотах нижней ионосферы плазма является пассивной примесью и движется со скоростью нейтральной компоненты [5]. Мы, однако, не можем непосредственно измерять доплеровскую частоту сигнала, рассеянного ИПН, так как характерное время жизни неоднородностей меньше периода доплеровских колебаний. Преодолеть эту трудность позволяет измерение фазы рассеянного сигнала, по которой затем рассчитывается скорость  $V$ . При этом погрешность определения  $V$  составляет в среднем 0,05 м/с [4] и лишь в условиях сильного нагрева, когда нагревная частота близка к критической частоте слоя, она может быть значительной. В условиях эксперимента фаза рассеянного сигнала в отдельные интервалы времени очень быстро менялась, что вызывало глубокие вариации  $V$ . Такие сеансы из анализа скорости исключались. По наблюдениям в августе 2000 г. основная масса измерений относится к интервалу значений скорости от –10 до +8 м/с со средним значением  $\langle V \rangle \approx -1$  м/с. Из рис. 2в), видно, что распределение вертикальной скорости по высоте значительно отличалось в вечерние часы и на восходе Солнца. Так, например, в вечерние и ночные часы как в D-, так и в Е-области скорость имела преимущественное направление вверх с градиентом до  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . После восхода

Солнца с периодичностью 15–20 минут происходила смена преимущественного направления  $V$  в Е-области, а на высотах области D наблюдались преимущественные движения вверх.

По измерениям 2001 г. большинство значений скорости содержится в интервале от  $-10$  до  $+10$  м/с. Средние за весь период наблюдений вертикальные скорости на высотах Е-области составили по абсолютной величине  $0,5-3,8$  м/с.

На рис. 4в) хорошо видно, что в D-области в предзаходные часы скорости направлены из области ионизации как вверх, так и вниз. Вблизи 90 км чаще наблюдались движения вниз с отрицательным градиентом по высоте, который должен вызывать сгонку ионизации в «подслойный»  $E_s$ . На высотах спускающегося спорадического слоя скорости направлены внутрь области ионизации. Изменение средних величины и направления скорости в Е-области можно проследить по гистограммам распределения  $V$  для высот 85–124,8 км, которые для вечерних часов 15 июня 2001 г. показаны на рис. 5. Для каждой гистограммы приведены высота и среднее значение вертикальной скорости  $\langle V \rangle$  на этой высоте. Хорошо видно, что средняя величина и направление скорости зависят от высоты.

На высотах  $h \approx 92$  и  $h \approx 114$  км имела место смена знака средней скорости, то есть могло происходить образование спорадического слоя Е за счет механизма ветрового сдвига, то есть сгонки положительных ионов. Средние за весь период значения скорости невелики по модулю, но в каждом конкретном сеансе они могли быть значительными и иметь нужное для сгонки направление. Мы приводим средние значения, так как подробно не анализируем скорости в этой статье, но даже по ним видно, что на высотах 92 км и 114 км могло происходить образование  $E_s$  за счет сгонки металлических ионов. Спорадические слои мы наблюдали именно на этих высотах.

Определенные по высотным профилям  $V(h)$  сдвиги вертикальной скорости на высотах 100–113 км составили  $\frac{dV}{dh} \approx 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Такие сдвиги являются достаточными для формирования  $E_s$  путем сгонки долгоживущих металлических ионов. Во многих случаях максимум амплитуды сигнала от  $E_s$  наблюдался на высоте, где  $V \sim 0$ , а также на высотах, где имелся достаточный сдвиг скорости для сгонки (по оценкам, приведенным в [1], сгонка ионов может происходить уже при сдвигах вертикальной скорости порядка  $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ ).

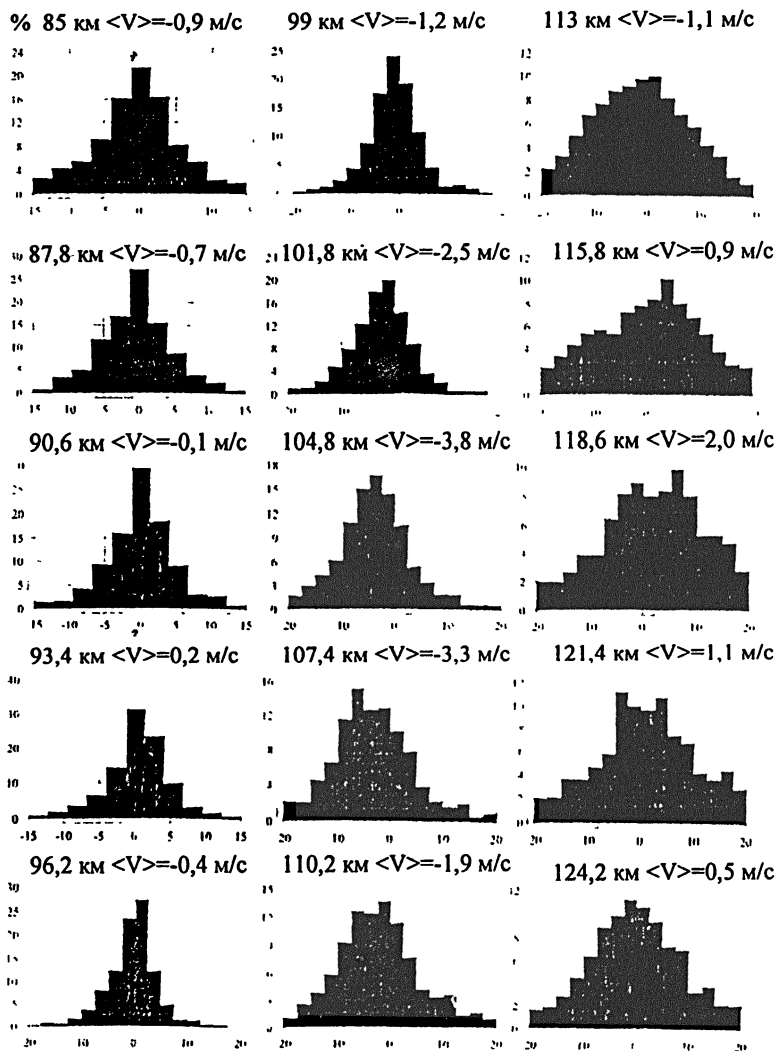


Рис. 5. Гистограммы распределения скорости вертикального движения на разных высотах в вечерние и ночные часы 15 июня 2001 г. На каждой гистограмме указаны высота и среднее значение скорости на данной высоте.



Особенности заходно-восходной перестройки динамического режима ионосферы нашли отражение в изменении вертикальной скорости с высотой, которые иллюстрирует рис. 6. На нем показано несколько последовательных профилей  $V(h)$  за интервалы времени, в которые включены время восхода и захода Солнца в E-области. Видно, что высотные вариации  $V$  имеют волнообразный характер с квазипериодом по высоте  $\sim 15$  км.

#### 4. Влияние $E_s$ на амплитуду и время релаксации рассеянного сигнала. Металлические ионы

Влияние  $E_s$  на амплитуду рассеянного сигнала не требует особых объяснений и заключается в том, что на высотной зависимости  $A(h)$  на высоте  $E_s$  наблюдается значительное увеличение амплитуды, иногда на 30–40 дБ, вследствие увеличения электронной концентрации в слое и роста коэффициента отражения. Понятно, что время релаксации также должно возрастать.

Если не учитывать влияния атмосферной турбулентности, что можно делать на высотах выше турбопаузы, то можно полагать, что релаксация неоднородностей в E-области обусловлена амбиполярной диффузией [2]. Тогда в отсутствие  $E_s$  высотная зависимость времени релаксации ИПН  $\tau(h)$  является экспоненциальной. Если же на какой-либо высоте существует  $E_s$ , на графике зависимости  $\tau(h)$  наблюдаются локальные максимумы, в которых значение  $\tau$  возрастает в несколько раз. При рассеянии от  $E_s$  увеличение электронной концентрации в нем по сравнению с фоновой концентрацией E-области приводит к уменьшению показателя преломления, увеличению длины волны в слое и увеличению времени диффузионного расплывания неоднородностей. При этом относительное изменение  $\tau$  можно записать соотношением

$$\delta\tau = \frac{\Delta\tau}{\tau_{dE}} = \frac{1}{2} \frac{\Delta n}{n}, \quad (1)$$

а изменение плазменной частоты  $E_s$  относительно фоновой E-области записывается выражением [4]

$$\delta f_0 = \frac{f_{0E_s}}{f_{0E}} = \frac{1}{2} \delta\tau \left[ \frac{f(f - f_L)}{f_{0E}^2} - 1 \right], \quad (2)$$

где  $f_{0E_s}$  и  $f_{0E}$  – плазменные частоты  $E_s$  и E-области,  $f_L = f_H \cos \theta$  – продольная компонента гирочастоты электронов. Подставив в эту формулу значения  $f = 5,67$  МГц;  $f_{0E} = 3,5$ –4 МГц;  $f_L = 1,3$  МГц и  $\delta\tau = 0,1$ –0,5, получим

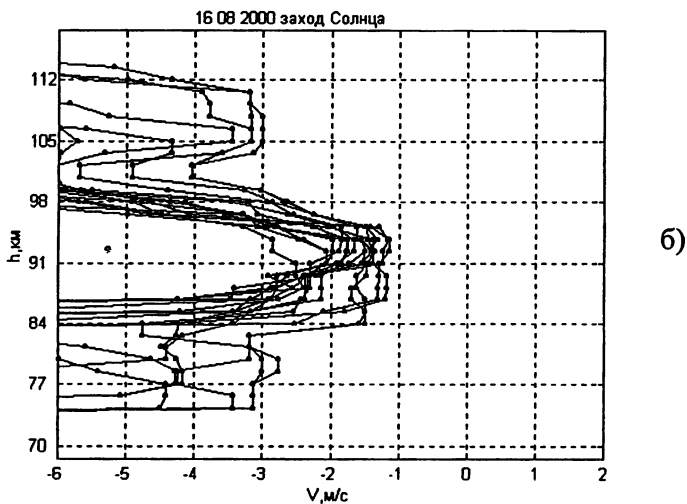
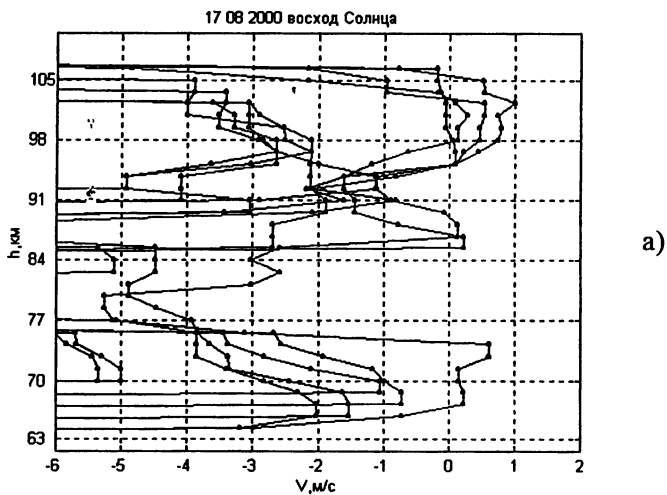


Рис.6. Высотные профили скорости вертикального движения для 16,17 августа 2000 г.: а) период захода, б) восхода Солнца

$\delta f_{0s}=0,03-0,25$ . Таким образом, даже не слишком интенсивные слои заметно увеличивают время релаксации ИПН.

Другим фактором, вызывающим увеличение  $\tau$ , является наличие на этих высотах долгоживущих металлических ионов, сгонка которых в узкие слои, согласно теории ветрового сдвига, приводит на средних широтах к образованию  $E_s$  [2]. Между тем диффузионное время релаксации ИПН  $\tau_d$  пропорционально относительной молекулярной массе преобладающих ионов  $M_i$  и выражается в виде

$$\tau_d = \frac{1}{K^2 D_a} = \frac{M_i \nu_{im}}{k(T_{e0} + T_{i0}) K^2}, \quad (3)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $K=4\pi/\lambda$  – волновое число стоячей волны,  $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$  – длина волны в среде,  $D_a$  – коэффициент амбиполярной диффузии,  $M_i$  – относительная молекулярная масса ионов,  $T_{e0}$  и  $T_{i0}$  – невозмущенные электронная и ионные температуры.

По результатам спектрометрических измерений (см., например, [7]) в спорадических слоях  $E$  обнаружены ионы металлов  $Fe^+$  ( $M_i=56$ ),  $Mg^+$  ( $M_i=24,25,26$ ),  $Ca^+$  ( $M_i=40$ ),  $Al^+$  ( $M_i=27$ ),  $Na^+$  ( $M_i=22$ ),  $Si^+$  ( $M_i=28$ ). Из (3) с очевидностью следует, что наибольшее влияние на величину  $\tau_d$  могли бы оказать ионы железа с атомной массой  $M_i=56$ , которая почти в 2 раза больше средней молекулярной массы преобладающих атмосферных ионов  $NO^+$ ,  $O_2^+$  и  $O^+$  ( $M_i=30, 32$  и  $16$  соответственно), или кальция ( $M_i=40$ ). Измерения показывают, что тяжелые ионы могут составлять от 30 до 80 % ионного состава  $E_s$  [8], и в этих случаях можно ожидать заметного увеличения  $\tau$  на высотах  $E_s$ . Если критические частоты  $E_s$  и  $E$ -области известны, то комбинируя (1) и (3), можно одновременно оценить влияние и показателя преломления  $n$  и относительной молекулярной массы металлических ионов  $M_{im}$  на величину времени релаксации рассеянного сигнала

$$\frac{\tau_{dE_s}}{\tau_{dE}} = \left( \frac{n_E}{n_{E_s}} \right)^2 \left( \frac{M_{im}}{M_{ia}} \right), \quad (4)$$

где  $M_{ia}$  – масса атмосферных ионов.

Таким образом, измеряя в эксперименте  $\frac{\Delta \tau}{\tau_E}$  или  $\frac{\tau_{dE_s}}{\tau_{dE}}$ , можно оценить массу металлических ионов.

Приведем некоторые оценки. Так, например, для измерений 15.06.2001 в интервале  $19^{45}-20^{45}$  получено  $\frac{\Delta\tau}{\tau_E} \approx 1,0-1,8$ . Если полагать

$f_0E=2,5\text{МГц}$ ,  $f_bE_s=3,0-3,5\text{ МГц}$ ,  $f=5,67\text{ МГц}$ , то получим для массы ионов значения 39 и 57, которые близки к массам Са и Fe, что выглядит достаточно правдоподобно. В то же время, для «классического»  $E_s$ , наблюдавшегося в предзаходные часы на высотах 95–105 км, нужно взять  $f_0E=2,0\text{МГц}$ ,  $f_bE_s=2,2\text{ МГц}$ ,  $f=5,67\text{ МГц}$  и  $\frac{\Delta\tau}{\tau_{E_s}} \approx 0,3$ . Тогда для массы ионов

получим значение  $M_{im}=37$ , что наиболее близко к атомной массе кальция. По ионосферным данным во время наблюдений 16,17 августа 2000 г. критическая частота E-слоя и частота экранирования  $E_s$  практически совпадали. В этом случае увеличение времени релаксации ИПН должно было определяться лишь массой металлических ионов. Характерно, что в это время изменения  $\tau$  в подавляющем большинстве сеансов составили 30–50%, что дает для  $M_{im}$  значения 37–42.

Таким образом, тип более тяжелых метеорных ионов, участвующих в образовании  $E_s$ , можно определять по высотной зависимости времени релаксации рассеянного сигнала (или, что тоже самое, времени релаксации ИПН). Необходимым условием для получения достоверных оценок является хорошее качество ионограмм для максимально правильного оценивания критических частот слоев.

## 5. Внутренние гравитационные волны и образование $E_s$ .

### Параметры неоднородностей в $E_s$

В рамках теории ветрового сдвига узкие интенсивные спорадические слои ионизации ( $E_s$ ) образуются в среднеширотной ионосфере под действием вертикального сдвига горизонтальной скорости плазмы или горизонтального ветра, так как в нижней ионосфере плазма является примесью и перемещается со скоростью нейтрального ветра [5]. Необходимые для сгонки плазмы ветровые сдвиги могут создаваться, в частности, прохождением интенсивных внутренних гравитационных волн (ВГВ) [2,3,6]. Не вызывает сомнения факт образования ВГВ в периоды прохождения через пункт наблюдения солнечного терминатора, то есть в периоды захода и восхода Солнца [9].

В научной литературе (см., например, обзоры [2,6] и монографию [5]) приводится достаточно много данных по наблюдениям  $E_s$  и их связи с ВГВ, приливами, перемещающимися ионосферными воз-

мушениям. Теоретически рассмотрен вопрос о возникновении необходимых для сгонки  $E_s$  сдвигов горизонтального ветра, инициированных ВГВ. По нашим измерениям методом ИПН в 1990-1991 гг., результаты которых подробно представлены в [2], ВГВ во многом определяют характер изменений вертикальной скорости с высотой.

Спектральный анализ амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала, а также вертикальной скорости на высотах E-области по результатам измерений в июне 2001 г., выявил волнообразные вариации этих параметров с характерными периодами 15, 30, 120 и 240 минут. Частота Бранта—Вяйсяля, на которой происходит резкое уменьшение интенсивности спектра, составила около 8 минут. По одновременным измерениям характеристик рассеянного сигнала в большом диапазоне высот можно было проследить за вариациями фазовой скорости волны, которая была направлена преимущественно вниз. На высотных профилях вертикальной скорости выделен квазипериод по высоте ~15 км. Можно предположить, что необходимые для образования снижающегося спорадического слоя E ветровые сдвиги по наблюдениям 15,16 июня 2001 г. могли быть обусловлены прохождением интенсивных ВГВ.

Интересную особенность процесса формирования верхнего  $E_s$  в предзаходные часы 15 июня 2001 г. иллюстрирует рис.7, где приведены яркостные записи амплитуды рассеянного сигнала. Чуть ниже высоты 115 км, на которой потом появляется  $E_s$ , виден слой, амплитуда рассеянного сигнала от которого близка к амплитуде ИПН от E-области, а вот время релаксации существенно меньше. На последовательных кадрах видно, как развивается  $E_s$ , интенсивность которого с течением времени значительно увеличивается, и он сливается с этим маленьким слоем. Приблизительно через 30 минут  $E_s$  ослабевает, затем процесс начинается вновь. При этом маленький слой никуда не исчезает. Происхождение таких долгоживущих слоев не удастся однозначно интерпретировать. Можно лишь предположить, что такие долгоживущие слои появляются в результате расслоение регулярного E-слоя [2].

Как отмечалось выше, спорадические образования, особенно «подслойные», имели ярко выраженную «облачную» структуру, и амплитуда сигнала в центре «облака» могла быть на 10–40 дБ выше, чем по краям. Согласно подробно изложенной в [2] теории образования и релаксации ИПН в области E, амплитуда рассеянного сигнала пропорциональна концентрации в неоднородностях, то есть указанное изме-

нение амплитуды соответствует относительной концентрации (центр «облака»-«края») до  $\delta N \sim 10^2$ .

Масштабы «облаков» приближенно можно оценить, как

$l = V_0 \cdot \xi$ , где  $V_0$  – скорость их горизонтального движения, а  $\xi$  – «протяженность» во времени. Полагая  $V_0 \sim 100$  м/с, получим масштабы  $l \sim 50$ – $200$  м и  $l \sim 150$ – $300$  м по результатам 2000 г. и 2001 г. соответственно. Неоднородности таких масштабов являются типичными для среднеширотных спорадических слоев [5]. Таким образом, можно полагать, что наблюдавшиеся «облака» ионизации представляли собой достаточно интенсивные среднемасштабные неоднородности. Подобные результаты были получены в [1] по результатам дневных измерений в августе 1999 г.

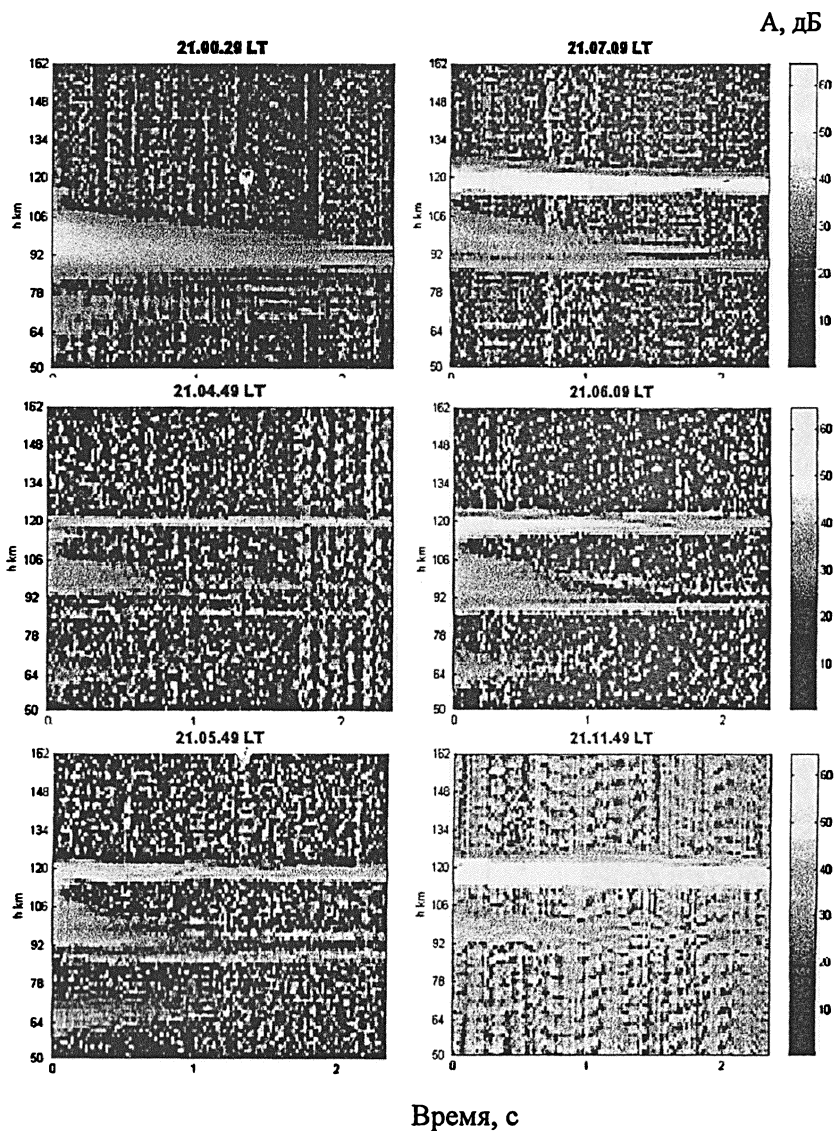
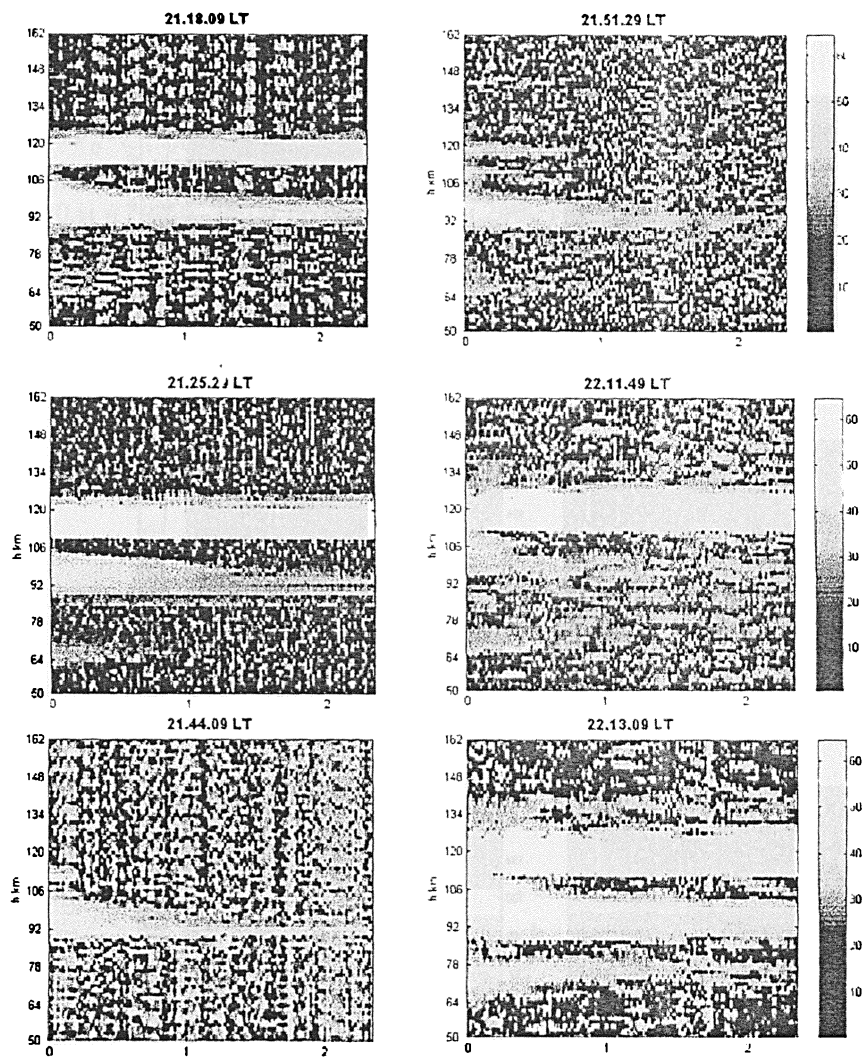


Рис. 7. Формирование спорадического слоя E на заходе Солнца 15.06.2001.



Время, с

Рис.7. Формирование спорадического слоя E на заходе Солнца 15.06.2001 (продолжение).



## Выводы

В работе приведены результаты исследований заходно-восходных явлений в нижней ионосфере методом обратного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы. Наблюдались различные типы спорадических образований на высотах E-области. Выяснено, что наиболее стабильно наблюдались «классические»  $E_s$ , высота максимума которых близка к высоте E-области. Исследованы особенности заходно-восходных вариаций характеристик рассеянного сигнала. По высотной зависимости времени релаксации сделаны оценки молекулярной массы метеорных ионов, участвующих в образовании  $E_s$ . Оказалось, в частности, что этими ионами могли быть ионы железа и кальция.

Одновременные измерения амплитуды, времени релаксации и скорости вертикального движения ионосферной плазмы позволили исследовать их высотные профили и временные зависимости, оценить параметры волновых движений на этих высотах.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по грантам РФФИ № 01-05-65025 и № 02-05-65281.

### Список литературы

1. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В. Исследование неоднородной структуры ионосферы с помощью рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях // Изв. вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. № 12. С. 1003—1015.
2. Whitehead J.D. Recent work on mid-latitude and equatorial sporadic-E // JATP. 1989. V. 5<sup>1</sup>. No 5. P. 401—424.
3. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А. Исследование сумеречной D-области ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. // Изв. вузов. Радиофизика. 2002. Т. 45. № 6. С. 502—508.
4. Бенедиктов Е.А., Беликович В.В., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей.—Н. Новгород: ИПФ РАН, 1999. 156 с.
5. Гершман Б.Н., Игнатьев Ю.А., Каменецкая Г.Х. Механизмы образования ионосферного спорадического слоя на различных широтах.—М.: Наука, 1976—108 с.
6. Mathews J.D. Sporadic E: current views and recent progress // JASTP. 1988. V. 60/ No 4. P. 413—435.
7. Kumar S., Hanson W.B. Morphology of metallic ions in the upper atmosphere // J. Geophys. Res. 1980. V. 85. P. 6783.
8. Huuskonen A., Nygren T., Jalonon L. et.al. Ion composition in sporadic E layers measured by the EISCAT UHF radar // J. Geophys. Res. 1988. V. 93. P. 14603.
9. Сомсиков В.И. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. —Алма-Ата: Наука, 1983.—192 с.

Бахметьева Наталия Владимировна  
Беликович Витольд Витальевич  
Каган Людмила Марковна  
Понятов Алексей Александрович

**Формирование и динамика спорадических слоев ионизации  
в E-области ионосферы в заходно-восходные часы  
по наблюдениям методом резонансного рассеяния радиоволн  
на искусственных периодических неоднородностях  
ионосферной плазмы**

---

Подписано в печать 30.10.03. Формат 60x84/16  
Бумага писчая. Объем 1,5 усл.п.л.  
Заказ 5523. Тираж 100. Бесплатно

---

Отпечатано в НИРФИ  
Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25