

УДК 550 388 2

О МЕЛКОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЕ ОБЛАСТИ F ИОНОСФЕРЫ

В. Е. Засенко

В работе по данным непрерывной регистрации действующей высоты при вертикальном зондировании на фиксированной частоте анализируется тонкая структура диффузных отражений. Высказано предположение о наличии в ионосфере локальных областей генерации неоднородностей мелкого масштаба. Некоторые участки записей можно интерпретировать как отражения от расщепляющихся неоднородностей.

Экспериментально установлено, что при зондировании ионосферы отраженный сигнал большую часть времени является диффузным. Природа диффузного состояния ионосферного радиоканала в настоящее время еще недостаточно изучена. Низкая разрешающая способность прямоугольных радиоимпульсов длительностью порядка 100 мкс, обычно применяемых для исследования ионосферы, не позволяет раскрыть внутреннюю структуру диффузного сигнала.

Цель данной работы — описать морфологические особенности тонкой структуры диффузных отражений и провести предварительную интерпретацию новых экспериментальных результатов, касающихся мелкомасштабной части спектра ионосферных неоднородностей, ответственных за диффузный сигнал. Приводимые здесь результаты были получены при вертикальном зондировании ионосферы установкой, работающей со сложным сигналом [1,2], что позволило повысить точность измерения высоты и разрешающую способность по высоте до 1,5 км, на порядок лучше по сравнению с типовыми установками, применяемыми для ионосферных измерений.

Исследования проводились в Иркутске методом непрерывной регистрации действующей высоты при вертикальном зондировании (метод $h'(t)$) на фиксированной частоте в диапазоне 3—4 МГц, что соответствует отражению от нижней части области F.

Экспериментальный материал представляет собой фотозапись на киноплёнке временных распределений положительных максимумов корреляционной функции одной квадратурной составляющей отклика ионосферы.

След на плёнке, отображающий зависимость $h'(t)$ при приеме диффузного радиоотражения, в отличие от однолучевого сигнала, становится неоднозначным. Из всего многообразия хаотических и более-менее упорядоченных изменений следа при регистрации диффузных сигналов можно выделить участки записей, на которых групповая задержка претерпевает квазипериодические изменения. Такие участки записей (в дальнейшем будем их называть «вспышкой») могут иметь различную продолжительность и отличаться другими признаками. Пример вспышки приведен на рис 1, показывающем зависимость групповой задержки отраженного сигнала от времени. Из рис. 1 видно, что до отметки t_0 отраженный сигнал был однолучевым с задержкой τ_1 . С момента t_0 групповая задержка сигнала начинает быстро изменяться:

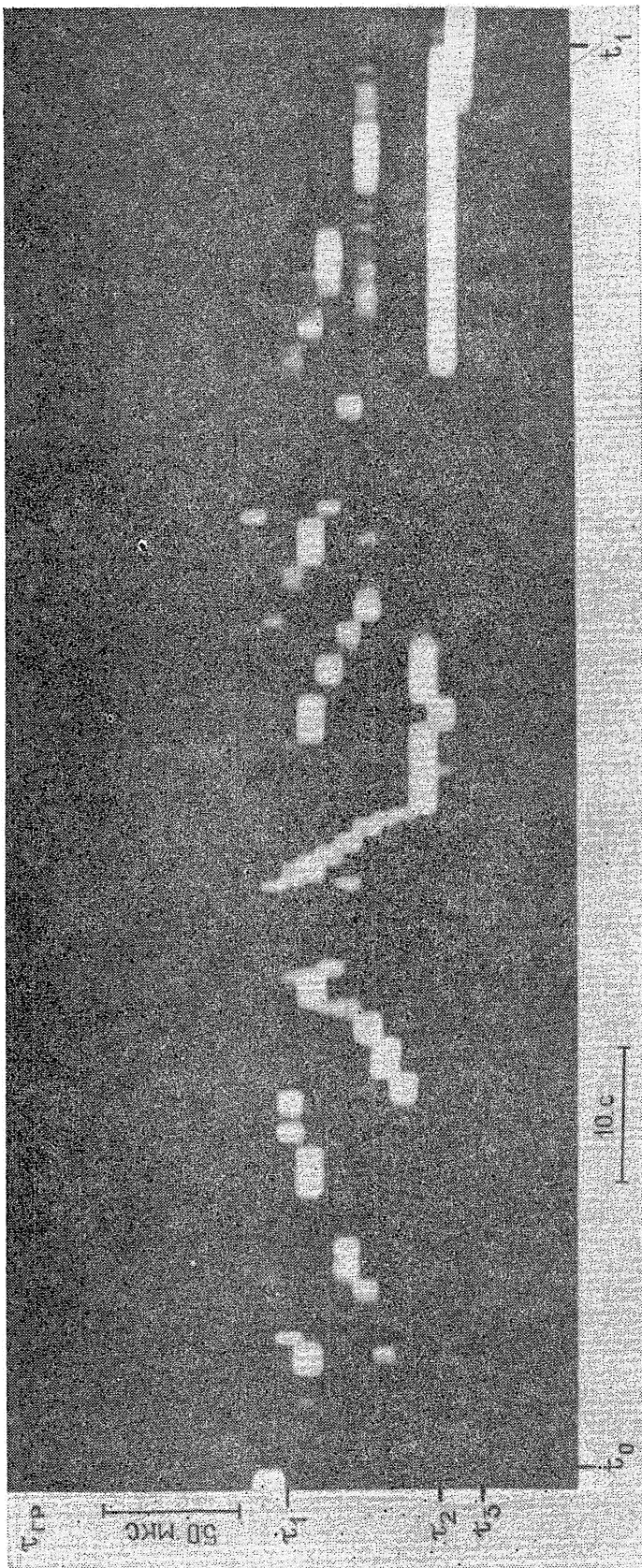


Рис. 1.

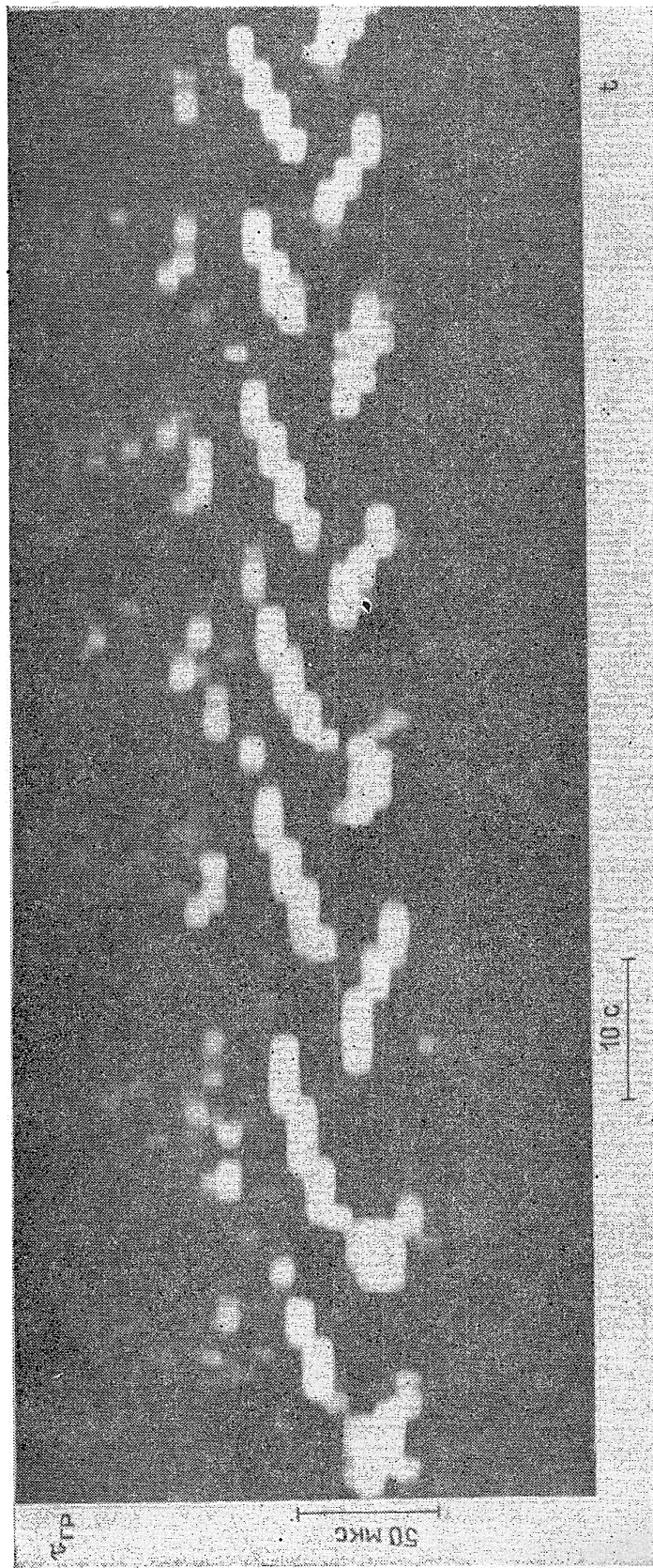


Рис 2.

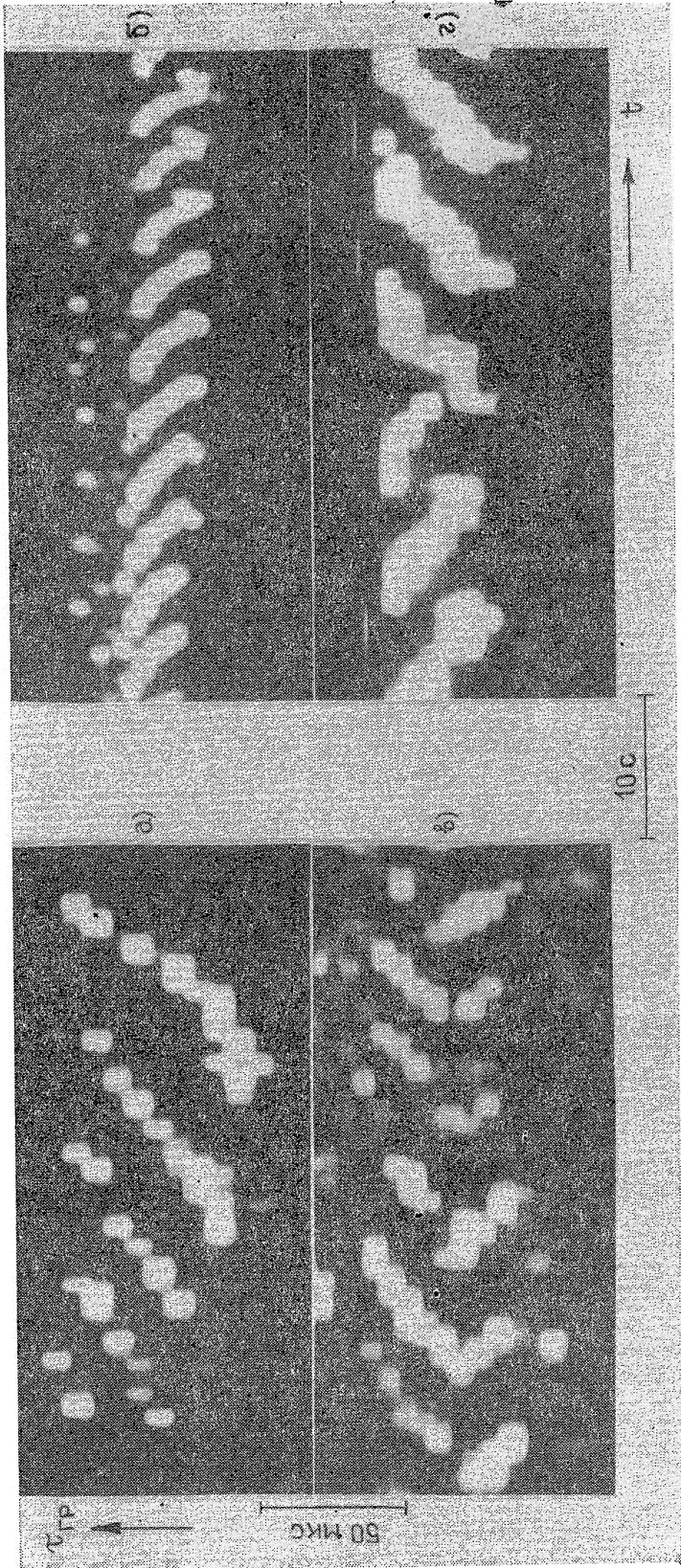
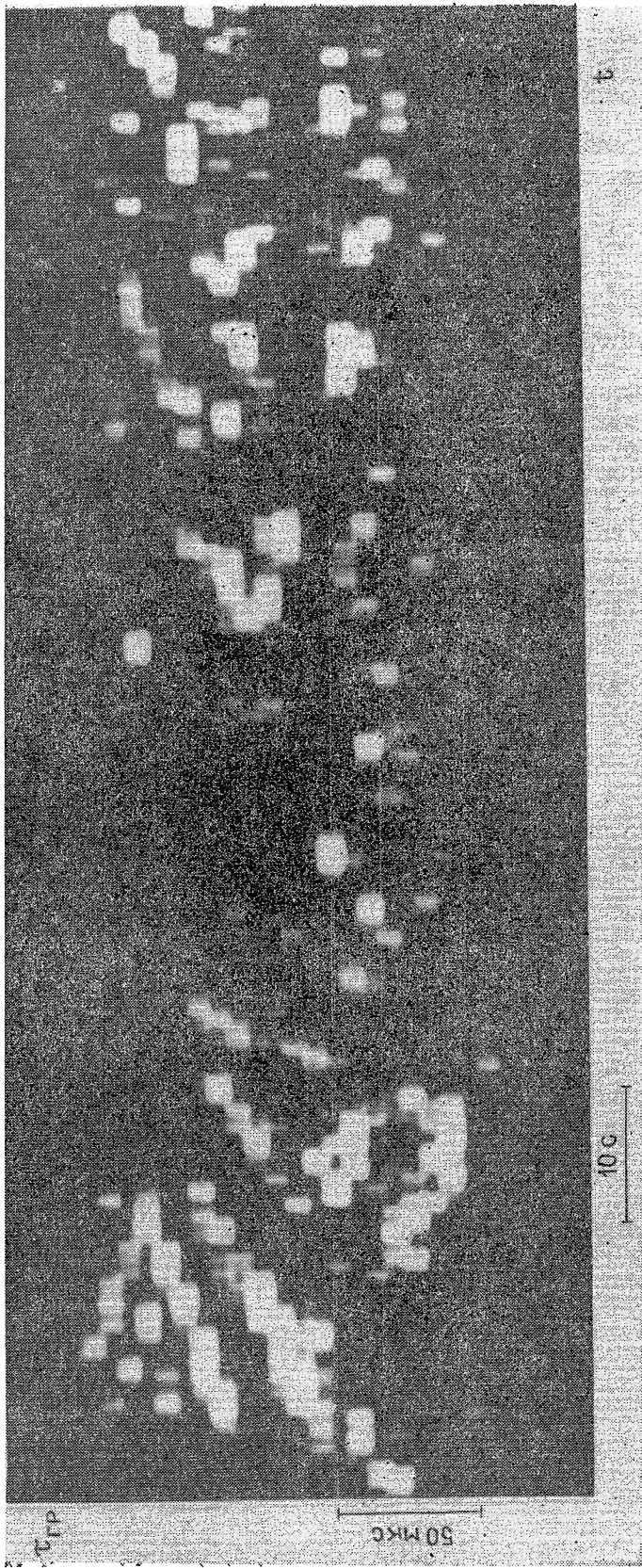


Рис. 3.



наблюдается два периода скачкообразного уменьшения задержки и постепенного ее роста, а затем быстрого уменьшения до значения τ_2 , выше которого в течение некоторого промежутка времени еще наблюдаются повторяющиеся отражения с отрицательным приращением групповой задержки. После вспышки, с момента t_1 , снова наблюдается однолучевой сигнал с задержкой τ_3 , отличающийся от τ_1 на 80 мкс, что соответствует 12 км по кажущейся высоте. В экспериментах с простым сигналом, когда ширина невозмущенного следа составляет 15—30 км [5], такие процессы наблюдать невозможно.

Фрагмент записи другой вспышки представлен на рис. 2. Отчетливо наблюдается квазипериодическое повторение ситуации, когда регистрируется присутствие одного, затем одновременно двух отраженных сигналов, групповое время запаздывания которых получает положительное и отрицательное приращение. За время одного периода изменение действующей высоты отражения сигнала с положительным приращением задержки может достигать 13,5—15 км, а с отрицательным 4,5—6 км. В некоторые моменты времени можно одновременно наблюдать на различных дальностях до четырех—пяти отраженных сигналов.

Ширина максимума корреляционной функции, отображающей сигнал на выходе приемника, соответствует 10 мкс и представляет собой элемент разрешения по времени. Два сигнала, наложенные друг на друга на входе приемника, будут регистрироваться отдельно при условии превышения разностью хода этих сигналов элемента разрешения. Дискретность отсчета приводит к ступенчатому отображению плавных изменений времени задержки. Частота переходов задержки сигнала на новый дискрет определяется скоростью изменения групповой задержки, которую можно определить как отношение элемента разрешения к длительности существования сигнала на фиксированной дальности:

$$d\tau_{гп}/dt = 10/\Delta t \text{ [мкс/с]}. \quad (1)$$

Квазипериодические радиоотражения появляются случайно во времени, отличаются продолжительностью процесса, числом колебаний, скоростью изменения групповой задержки и длительностью квазипериодов.

В зависимости от знака приращения времени задержки отраженного сигнала можно выделить четыре типа следов, образцы записей которых показаны на рис. 3. Следы, приведенные на рис. 3а, характеризуются положительным приращением задержки, а на рис. 3б приращение задержки отрицательное. Скорость изменения групповой задержки, определяемая по формуле (1), составляет в первом случае $v_a = 5 \text{ мкс/с}$ и $v_b = -5,5 \text{ мкс/с}$ во втором случае. Довольно часто встречаются моменты одновременного существования положительных и отрицательных вариаций задержек (рис. 3в). Рис. 3г воспроизводит момент реверса скорости — наклон следов за короткий промежуток времени изменяется с положительного на отрицательный.

Характер вспышек, наблюдаемых в дополуночное время, на фоне общего роста ионизации отличается от послеполуночных, когда ионизация уменьшается. Специфической чертой дополуночных вспышек является то, что они более кратковременны, и после вспышки всегда наблюдается однолучевой сигнал с меньшей групповой задержкой. Пример дополуночной вспышки показан на рис. 1.

Послеполуночные вспышки более продолжительны. В результате их действия групповая задержка обычно увеличивается. Если с течением времени в процессе вспышки возрастает скорость изменения групповой задержки, тогда повышается вероятность последующего образования полностью рассеянного сигнала.

В послеполюденное время вспышки наблюдались чаще, чем в до-полуденное. Максимум вероятности появления вспышек находится в окрестности 16 часов местного времени.

Рассеянный сигнал наблюдается после продолжительной (с длительностью порядка 3—4 мин) вспышки, в процессе которой скорость изменения групповой задержки возрастает. Момент перехода упорядоченного радиоотражения к хаотическому показан на рис. 4. Из рисунка видно изменение скорости групповой задержки от периода к периоду и постепенный рост общей групповой задержки. Рассеянный сигнал представляет собой некоторое множество зеркально отраженных сигналов, имеющих различные временные задержки.

Основными параметрами анализируемого явления можно считать: продолжительность вспышки, период и скорость изменения групповой задержки в процессе вспышки. Гистограммы распределения основных параметров приведены на рис. 5.

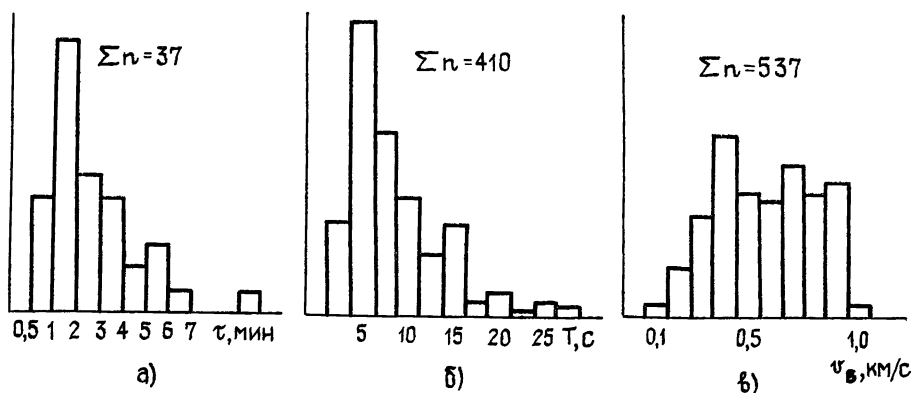


Рис. 5.

За продолжительность вспышки мы принимаем отрезок времени $\Delta t = t_1 - t_0$ (рис. 1), на протяжении которого наблюдаются ярко выраженные квазипериодические колебания действующей высоты. Как следует из гистограммы (рис. 5а), наиболее часто наблюдаются вспышки продолжительностью порядка одной минуты.

Под периодом вспышки мы понимаем время полного цикла изменения групповой задержки. Наиболее короткие периоды, отмеченные нами при исследовании экспериментального материала, лежат в пределах 2—2,5 с. Гистограмма периодов, представленная на рис. 5б, показывает, что наиболее часто встречающееся значение периодов находится на интервале порядка 5 с. Можно отметить вторичный максимум с периодами порядка 15 с.

Скорость изменения групповой задержки $d\tau_{gp}/dt$, определение которой было дано выше (1), является важным параметром, характеризующим кажущуюся вертикальную скорость сноса неоднородностей. Гистограмма распределения скоростей, приведенная на рис. 5в, показывает, что скорости порядка 1 км/с встречаются довольно часто.

В тех случаях, когда кроме вертикально отраженного сигнала на записях $h'(t)$ присутствует наклонное отражение, вспышки можно наблюдать как на основном следе, так и на дополнительном, но со сдвигом во времени. Этот факт свидетельствует о том, что вспышки возникают в локализованных областях ионосферы.

Исходя из этого можно заключить, что определенная нами характеристика — период изменения групповой задержки может характеризовать горизонтальный размер неоднородностей данной локальной зо-

ны. В предположении, что скорость горизонтального дрейфа $v_r = 150$ м/с [3], наиболее вероятные значения горизонтальных размеров неоднородностей лежат в пределах 500—1000 м.

Данные, приведенные выше, относятся к процессам, происходящим в естественных условиях. В то же время при диагностике искусственно возмущаемой области ионосферы в Горьком в апреле и октябре 1978 г. подобные явления наблюдались нами в каждом, без исключения, сеансе работы греющего передатчика.

Естественные процессы качественно подобны возбуждаемым искусственным путем, но последние имеют некоторые специфические особенности. Механизм, порождающий квазипериодические радиоотражения, начинает работать спустя несколько секунд после включения греющего передатчика. Размах колебаний групповой задержки в 2—3 раза превышает значения, наблюдаемые в естественных условиях. После выключения греющего передатчика колебания групповой задержки затухают не сразу, а продолжают длительное, порядка 8—10 мин, время, после чего область возвращается к невозмущенному состоянию. По истечении некоторого промежутка времени, порядка 10 мин, область возмущается повторно, уже без искусственного вмешательства, после чего вновь наступает состояние успокоения. Другими словами, стадия восстановления носит колебательный характер.

Обсуждение результатов. Попытаемся дать интерпретацию полученных результатов с точки зрения существующих представлений о неоднородной структуре ионосферы и движения мелкомасштабных неоднородностей. В [4] показано, что в экваториальной области мелкомасштабные неоднородности в среднем развиты значительно сильнее в нижней части слоя F и могут быть сосредоточены в узких высотных интервалах. Наши результаты относятся к средним широтам, но мы вправе предположить, что и здесь процессы образования зон, в которых могут генерироваться мелкомасштабные неоднородности, локализуются также в нижней части области F . Образующиеся здесь неоднородности переносятся в другие области ионосферы, и получаемые радиоотражения характерны для тонких, полупрозрачных неоднородностей, движущихся со скоростью, которая имеет значительную вертикальную составляющую.

Наблюдаемые нами радиоотражения с явно выраженным как положительным, так и отрицательным характером приращения задержки (рис. 2) можно попытаться объяснить наличием механизма, вызывающего не только «всплывание» неоднородностей, но и их симметричное «погружение». При этом необходимо предположить, что возникающая в месте генерации неоднородность с течением времени расщепляется на две тонкие неоднородности, движущиеся в противоположных направлениях с одинаковой скоростью, как бы отталкиваясь друг от друга. Через некоторый отрезок времени на месте расщепившейся неоднородности образуется новая и процесс повторяется. Постепенное накопление тонких неоднородностей в нижележащих областях приводит к медленному росту групповой задержки сигнала, что мы и наблюдаем в эксперименте.

На рис. 6 приведена последовательность ионограмм, отражающих представленную выше ситуацию. Вспышка, фрагмент которой показан на рис. 2, длилась 4 мин в промежутке между 15^h40^m и 15^h45^m LT — верхние ионограммы. Ионограмма за 15^h55^m демонстрирует заполнение впадины ионизации между слоями $F1$ и $F2$ неоднородностями, «всплывающими» от места генерации. Следующая ионограмма за 17^h14^m показывает появление слоя E_s . Возможно, что его появление стимулировано «погружающимися» неоднородностями. О связи рассеянных отражений с появлением слоя E_s отмечалось в [5].

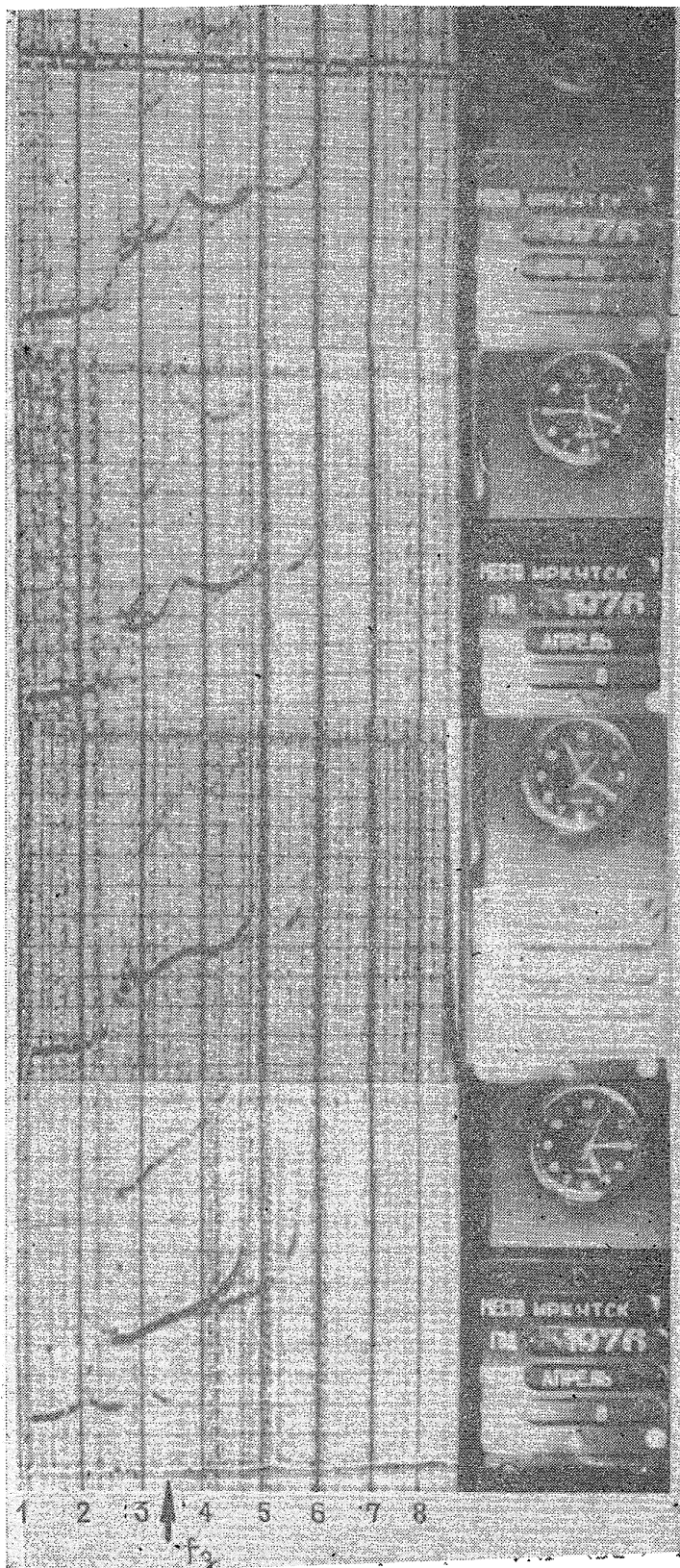


Рис. 6.

Отражением от «всплывающих» и «погружающихся» тонких, полупрозрачных неоднородностей можно объяснить и другие типы следов, представленных на рис. 3.

Вполне возможно, что нам удалось экспериментально зарегистрировать эффект расщепления движущихся неоднородностей [6,7].

Подтверждением того, что при искусственном нагреве создаются условия для движения возникающих неоднородностей вверх и вниз относительно области нагрева, могут служить данные измерения доплеровского сдвига частоты. Приводимые в работе [8] результаты показывают, что сдвиг частоты пробных сигналов, отражаемых от областей, расположенных выше искусственно возмущаемой области ионосферы, регистрировался с отрицательным знаком, в то время как частота, отраженная от нижележащих областей, получала положительное смещение.

Можно привести и другие примеры, дающие основание считать, что предложенная нами интерпретация тонкой структуры диффузного сигнала во всяком случае не противоречит опытными данным.

Таким образом, применение сложных сигналов, обладающих высокой разрешающей способностью, дает возможность раскрыть внутреннюю структуру диффузных сигналов. Это позволило, в частности, экспериментально обнаружить эффект периодической генерации и расщепления движущихся в ионосфере мелкомасштабных неоднородностей. В работе были также приведены основные характеристики периодических структур, содержащихся в диффузном сигнале.

В заключение отметим, что результаты экспериментальных исследований внутренней структуры диффузных сигналов могут лежать в основе оценки достоверности теоретических расчетов возникновения и существования ионосферных неоднородностей мелкого масштаба.

ЛИТЕРАТУРА

1. Засенко В. Е. Тезисы докладов X Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. — М.: Наука, 1972, с. 141
2. Засенко В. Е., Анищенко Л. П. — В сб.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. — Иркутск, 1975, вып. 33, с. 61.
3. Гершман Б. Н. Динамика ионосферной плазмы. — М. Наука, 1974.
4. Ерухимов Л. М., Максименко О. И., Мясников Е. Н. — В сб.: Ионосферные исследования. — М.: Сов. радио, 1980, № 30, с. 27.
5. Вергасова Г. В., Чернобровкина Н. А. — В сб.: Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. — Иркутск, 1970, вып. 15, с. 133.
6. Гуревич А. В., Цедилина Е. Е. — УФН, 1967, 91, вып. 4 с. 609.
7. Блаунштейн Н. Ш., Цедилина Е. Е. — В сб.: Эффекты искусственного воздействия мощным радиоизлучением на ионосферу Земли. — М.: Наука, 1983, с. 51.
8. Allen E. M., Thome C. D., Rao P. B. — Radio Sci., 1974, 9, № 11, p. 905.

Сибирский институт земного магнетизма,
ионосферы и распространения радиоволн
СО АН СССР

Поступила в редакцию
25 января 1984 г.

ON SMALL-SCALE STRUCTURE OF THE IONOSPHERIC f REGION

V. E. Zasenکو

This paper analyzes, on the basis of $h'(t)$ records, an exact structure of a diffuse echo. The supposition is made about the existence of local zones of small-scale irregularity generations in the ionosphere. Some data of the records can be interpreted as reflections from splitting irregularities.