



**Двадцать третья международная конференция
СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА ИКИ РАН, 10 - 14 ноября 2025 г.**



Спорадический слой E в экспериментах по воздействию на ионосферу мощным КВ радиоизлучением

Н.В. Бахметьева, Е.Е. Калинина, И.Н. Жемяков, А. А. Лисов

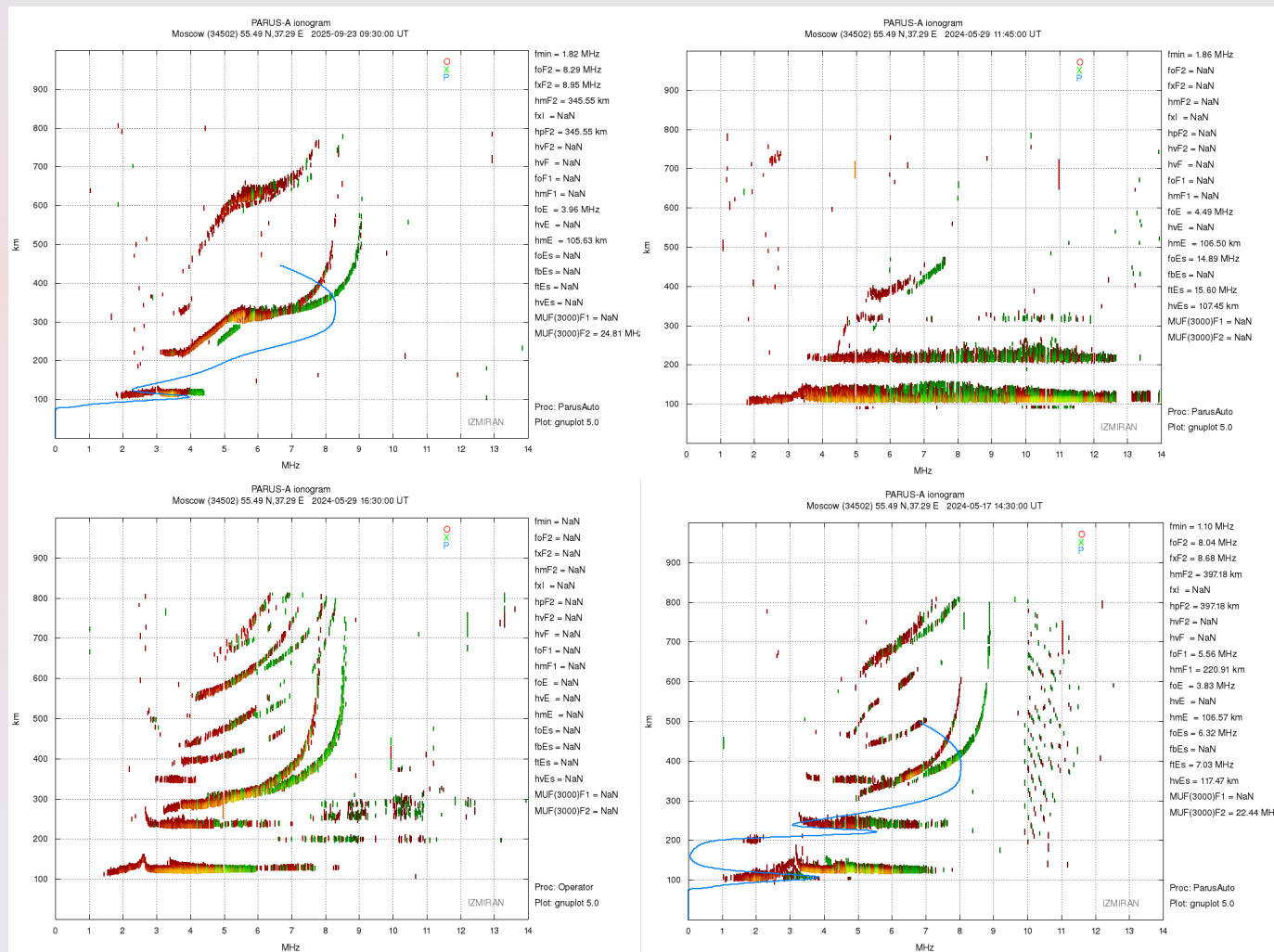
НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

При поддержке РФФ – грант № 25-27-00031

Спорадический слой E – известные свойства

- электронная концентрация N до $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$; высота слоя $h=90 - 120 \text{ км}$, толщина слоя $300 \text{ м} - 5 \text{ км}$; протяженность до 1000 км ;
- ионный состав – атомарные положительные ионы металлов Na^+ , Mg^+ ; Ca^+ , Si^+ , Fe^+ – долгоживущие с временем жизни от 60 минут до нескольких часов и суток; молекулярные ионы NO^+ и O_2^+ ;
- наблюдаются и короткоживущие слои, существующие несколько минут;
- полупрозрачные и экранирующие (blanketing), неоднородная (облачная) структура с «пэтчами» до 10 км ; полупрозрачные слои позволяют наблюдать отражения от вышележащих слоев, экранирующие их полностью экранируют;
- вероятность появления – максимальна в мае-июне; после восхода Солнца и около полуночи; в последние годы высокой солнечной активности спорадические слои наблюдаются гораздо чаще;
- скорость горизонтального движения порядка $30-70 \text{ м/с}$;
- механизм образования на средних широтах – перераспределение заряженных частиц в магнитном поле под действием неоднородного горизонтального ветра; методы исследования – метеорный радар, вертикальное зондирование, ракетные запуски со спектрографом, лидар, спутниковое зондирование;
- метод резонансного рассеяния пробных радиоволн на ИПН позволяет регистрировать слабые слои с критической частотой меньше $1-1,5 \text{ МГц}$, недоступные наблюдению ионозондом, определять тип преобладающих ионов в слое;
- методом вертикального зондирования определяются критические частоты слоя, метод частичных отражений позволяет измерять амплитуды и фазы рассеянных сигналов в нижней ионосфере.

Спорадический слой Е на ионограммах



<http://www.izmiran.ru/ionosphere/moscow>

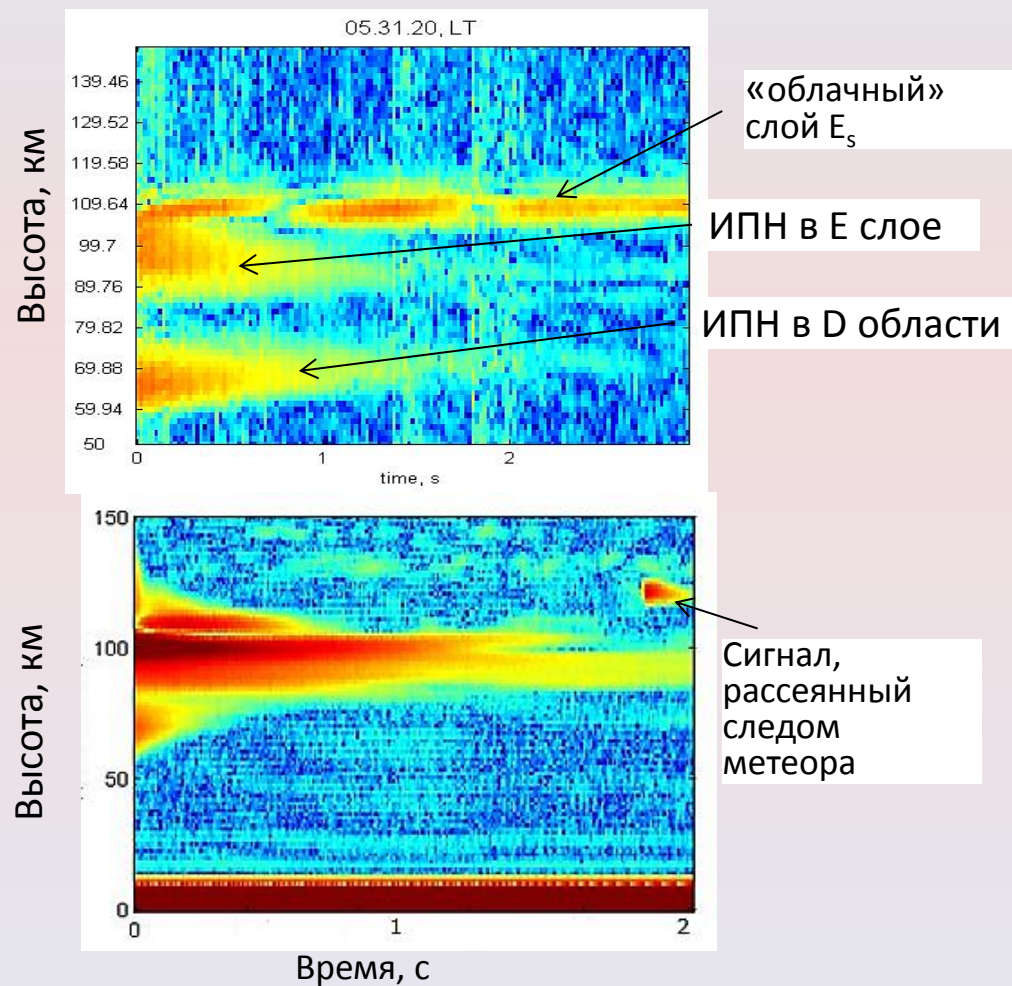
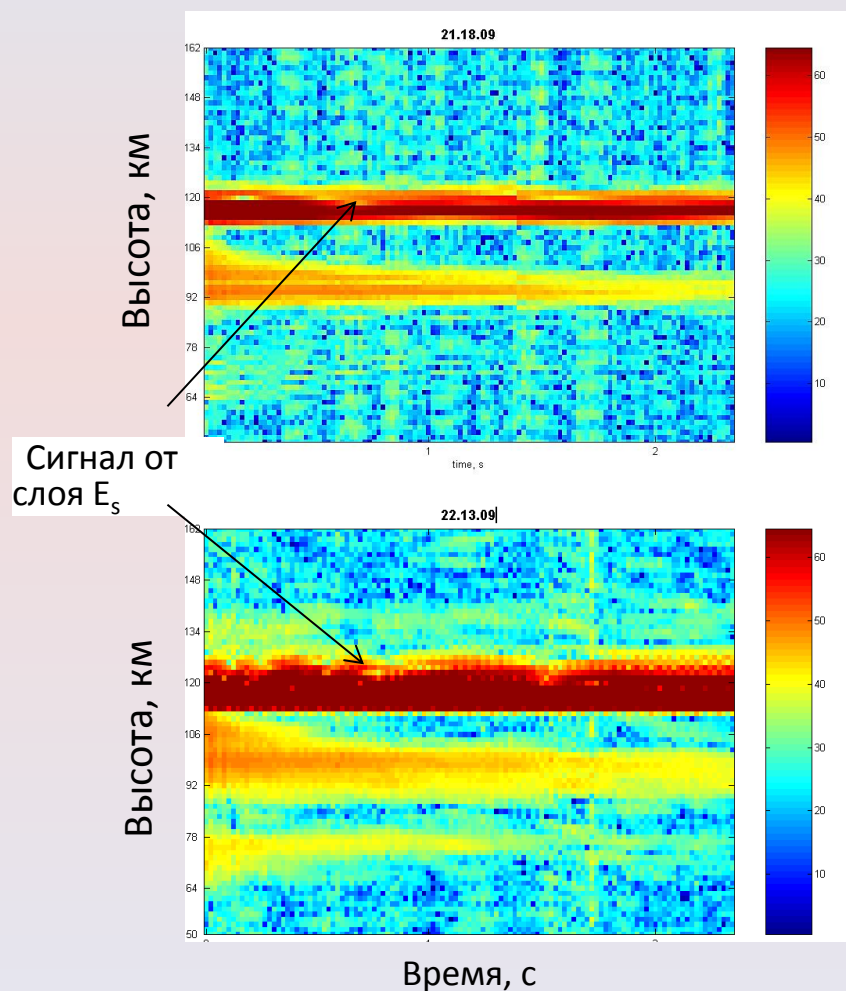
Нагрев ионосферы и спорадический слой E

Основные задачи

1. Создание искусственных периодических неоднородностей (ИПН) и диагностика нижней ионосферы. Цель экспериментов - определение основных параметров ионосферы и нейтральной атмосферы, влияние спорадического слоя E на амплитуду и время релаксации ИПН, определение параметров слоя E_s .
2. Воздействие на ионосферу мощным радиоизлучением с диагностикой пробными радиоволнами при вертикальном и наклонном зондировании. Цель экспериментов - исследование возмущенной области и ее неоднородной структуры, влияние слоя E_s на характеристики отраженных и рассеянных сигналов при искусственном возмущении ионосферы.
3. Воздействие на слой E_s мощным радиоизлучением с диагностикой ионосферы методами вертикального зондирования и частичных отражений. Цель экспериментов – исследование влияния нагрева ионосферы на спорадический слой E, исследование ИПН при дополнительном воздействии на ионосферу мощной радиоволной.

Инструменты: нагревный стенд СУРА, установка частичных отражений, специализированная аппаратура для приема всех ионосферных сигналов с регистрацией их квадратурных компонент в цифровом виде, измерением амплитуды и фазы.

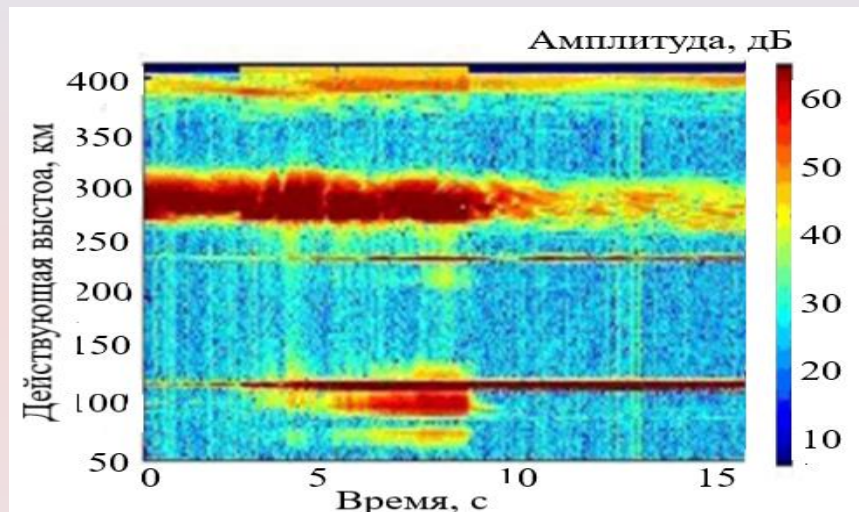
Спорадический слой E и ИПН в нижней ионосфере



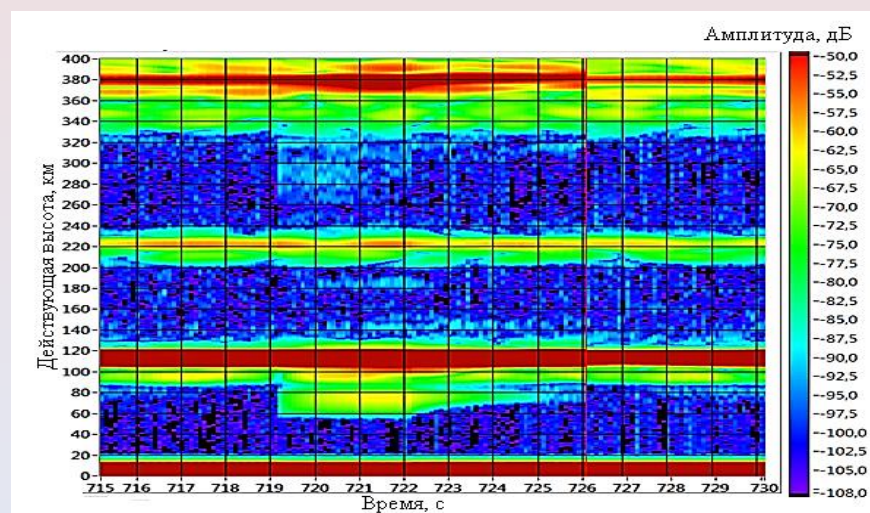
При формировании интенсивного и даже облачного слоя E_s значительно улучшаются условия образования ИПН в E-слое и D-области, в результате растет амплитуда рассеянного сигнала, что позволяет определять многие параметры ионосферы и нейтральной атмосферы с высокой точностью.

Спорадический слой E и ИПН в нижней ионосфере

16.07.2006, f=4,785 МГц, сеанс 11:31



02.09.2021, f=4,3 МГц, сеанс 12:46



Влияние спорадического слоя E: усиление ИПН в нижней ионосфере по мере развития слоя E_s , что дает уникальную возможность подробно исследовать D-область. При экранирующем слое E_s в D-области образуются интенсивные неоднородности, наблюдаются рассеянные сигналы часто с резкими границами и длительной релаксацией, что позволяет с высокой точностью определять ряд параметров D-области, в том числе высоту нижней границы области, обогащенной атомарным кислородом.

В E-области: релаксация ИПН обусловлена амбиполярной диффузией D_a и время

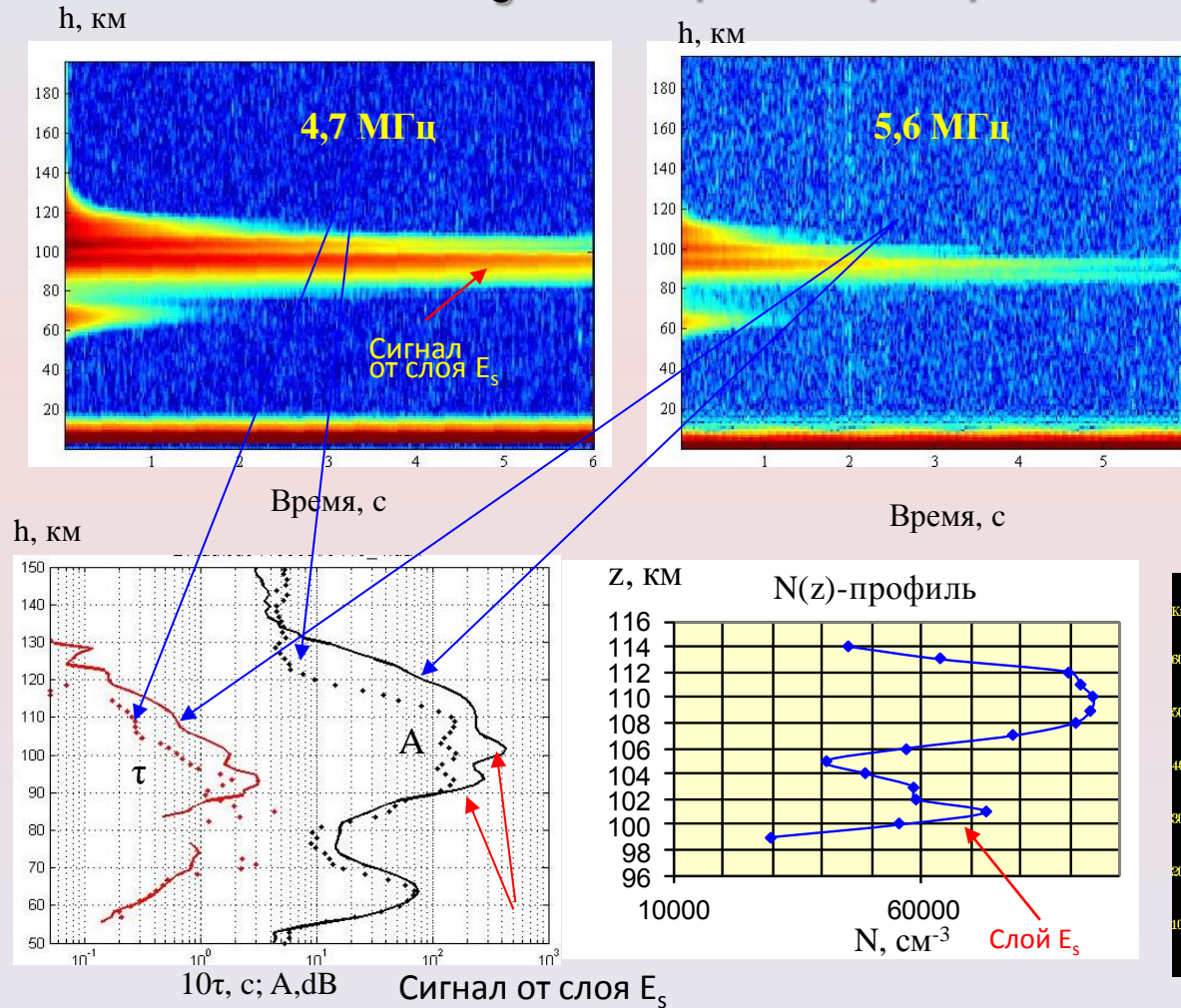
релаксации:

$$\tau = \frac{1}{K^2 D_a} = \frac{M v_{in}}{\kappa (T_{e0} + T_{i0}) K^2} \quad K = 4\pi n / \lambda_0$$

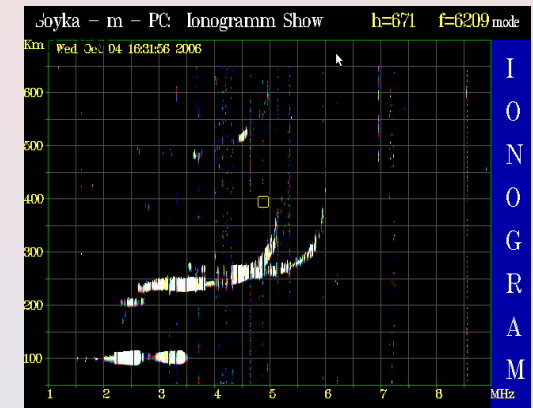
$$\frac{\tau_{E_s}}{\tau} = \left(\frac{n_E}{n_{E_s}} \right)^2 \left(\frac{M_M}{M_A} \right) \left(\frac{v_{in}^M}{v_{in}^A} \right) \quad \text{Отношение времени релаксации в слое } E_s \text{ и без него}$$

Получены массы ионов: $M_M \approx 39$ и 57 аем, близкие к массам $\text{Ca}^+(40)$ и $\text{Fe}^+(56)$; концентрация всех сортов металлических ионов $N_m \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$

Влияние слоя E_s на параметры рассеянного сигнала

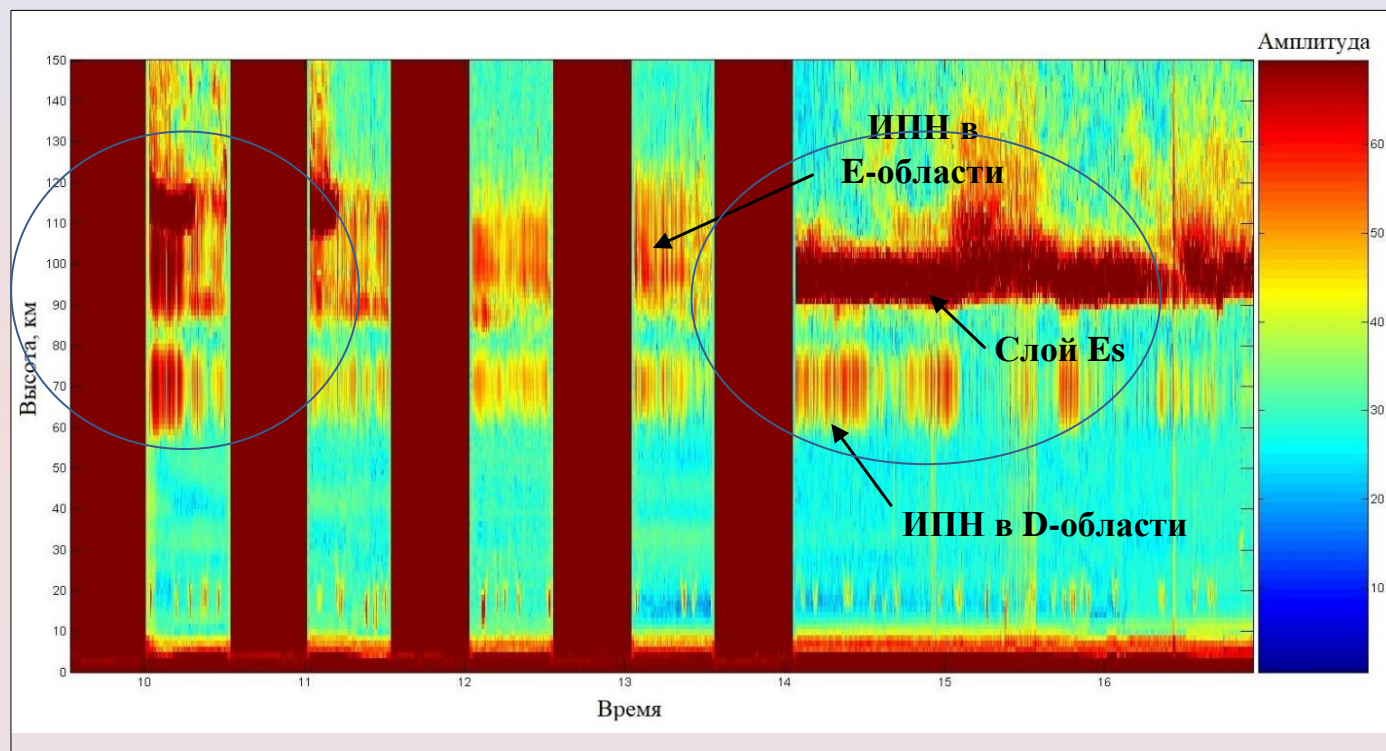


Регистрация рассеянного сигнала при создании ИПН на двух частотах позволяет с высокой точностью измерить высотный профиль электронной концентрации: пример 04.10.2006 в сеансе 16:29:10. Показан рост амплитуды и времени релаксации на высоте слоя E_s .



Высотные профили времени релаксации τ и амплитуды A рассеянного сигнала, профиль электронной концентрации $N(z)$, определенный методом ИПН и ионограмма вертикального зондирования с полупрозрачным слоем E_s (нижний ряд слева направо) .

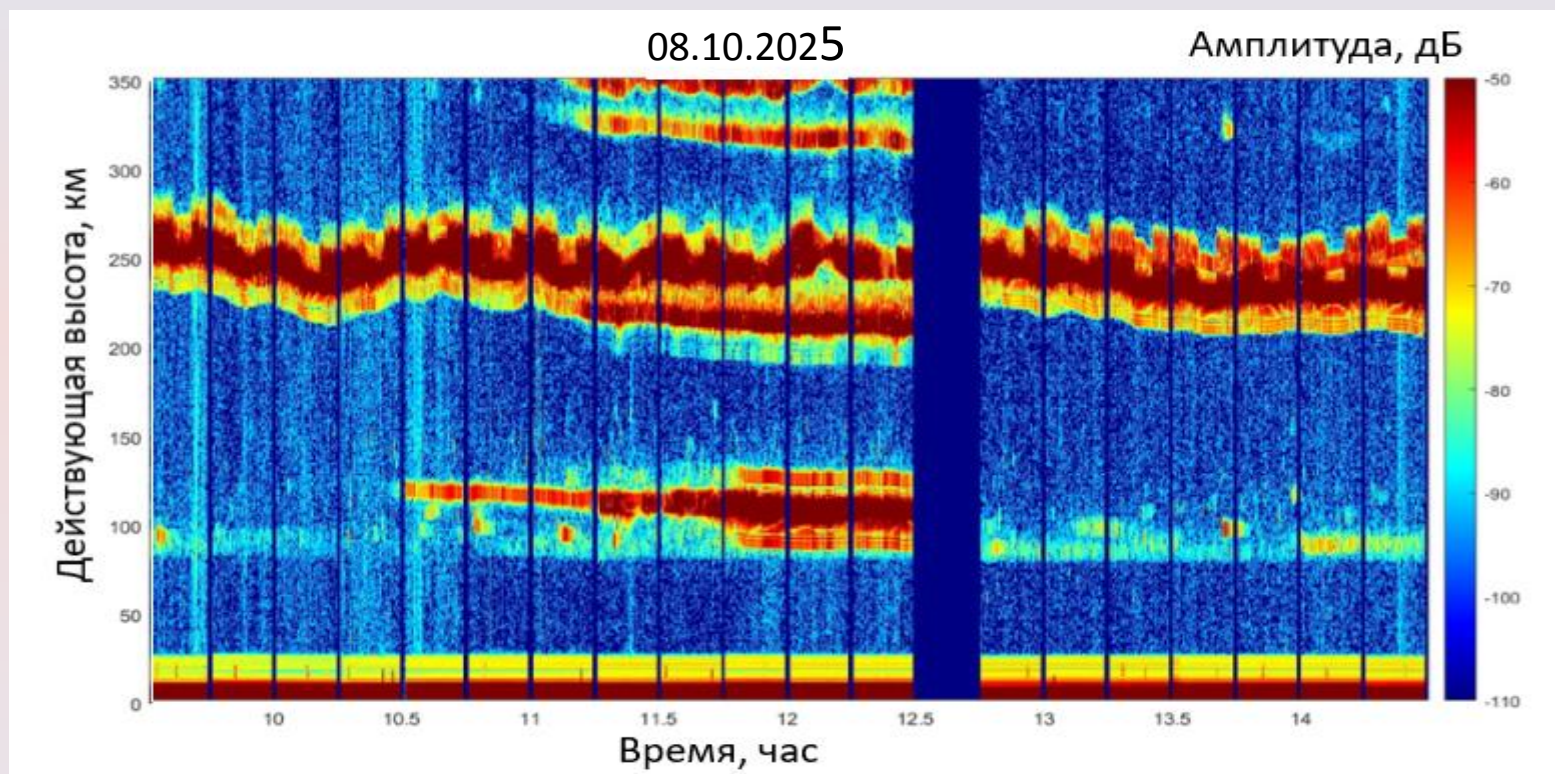
Слой E_s при длительных нагревах ионосферы 12.09.2019



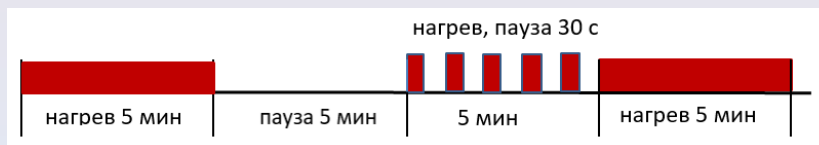
Высотно-временная зависимость амплитуды сигнала на высотах до 150 км за 12 сентября 2019 года. Амплитуда сигнала показана в яркостной шкале.

В сентябре 2019 г. проводился эксперимент по измерению спектра излучения атмосферы в линии озона при воздействии мощного КВ радиоизлучения стенда СУРА. В течение каждого часа: 30 минут – непрерывный нагрев, 30 минут – пауза в работе стенда и работа в режиме диагностики ионосферы методом ИПН, измерение характеристик пробного сигнала на стадии релаксации неоднородностей. В этом случае влияние движущегося диффузного слоя E_s заметно ухудшало образование ИПН. Красные вертикальные полосы – периоды нагрева.

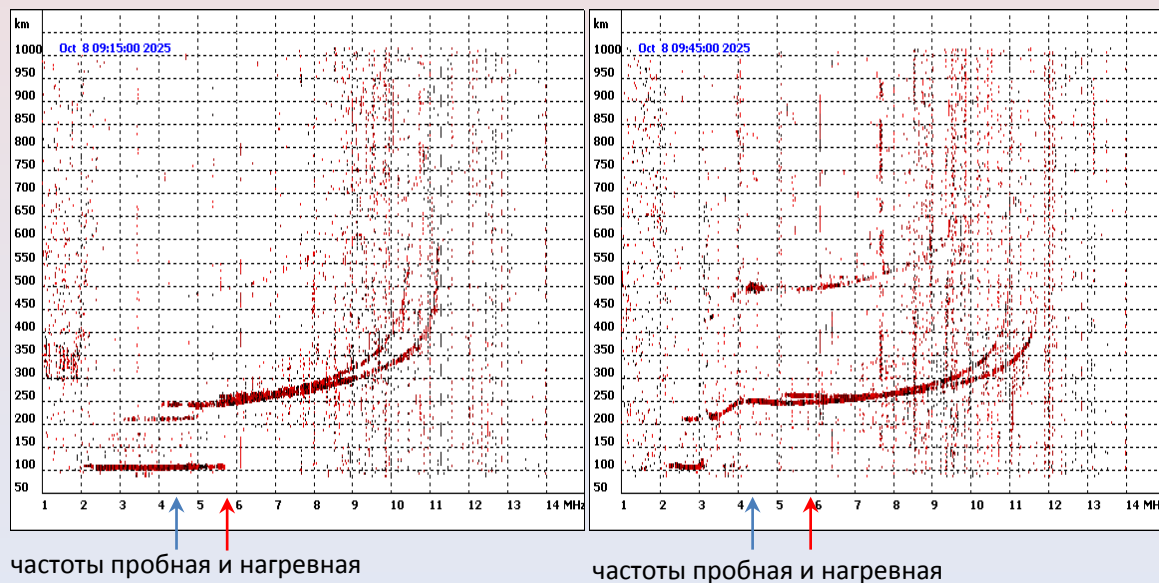
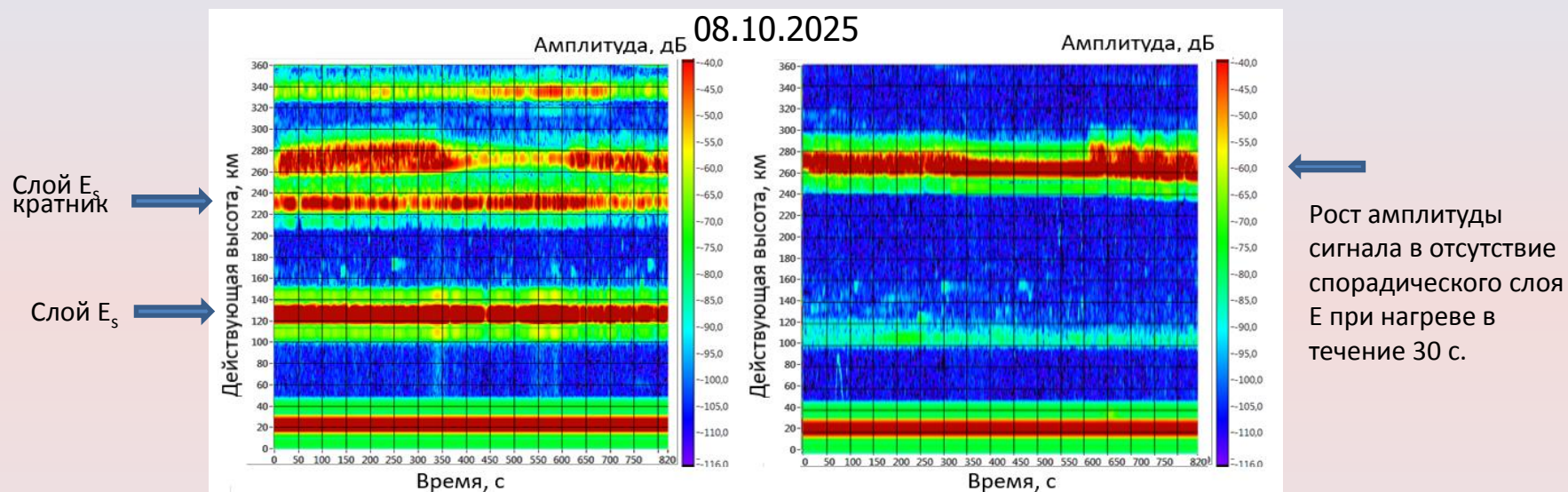
Исследование структуры возмущенной области



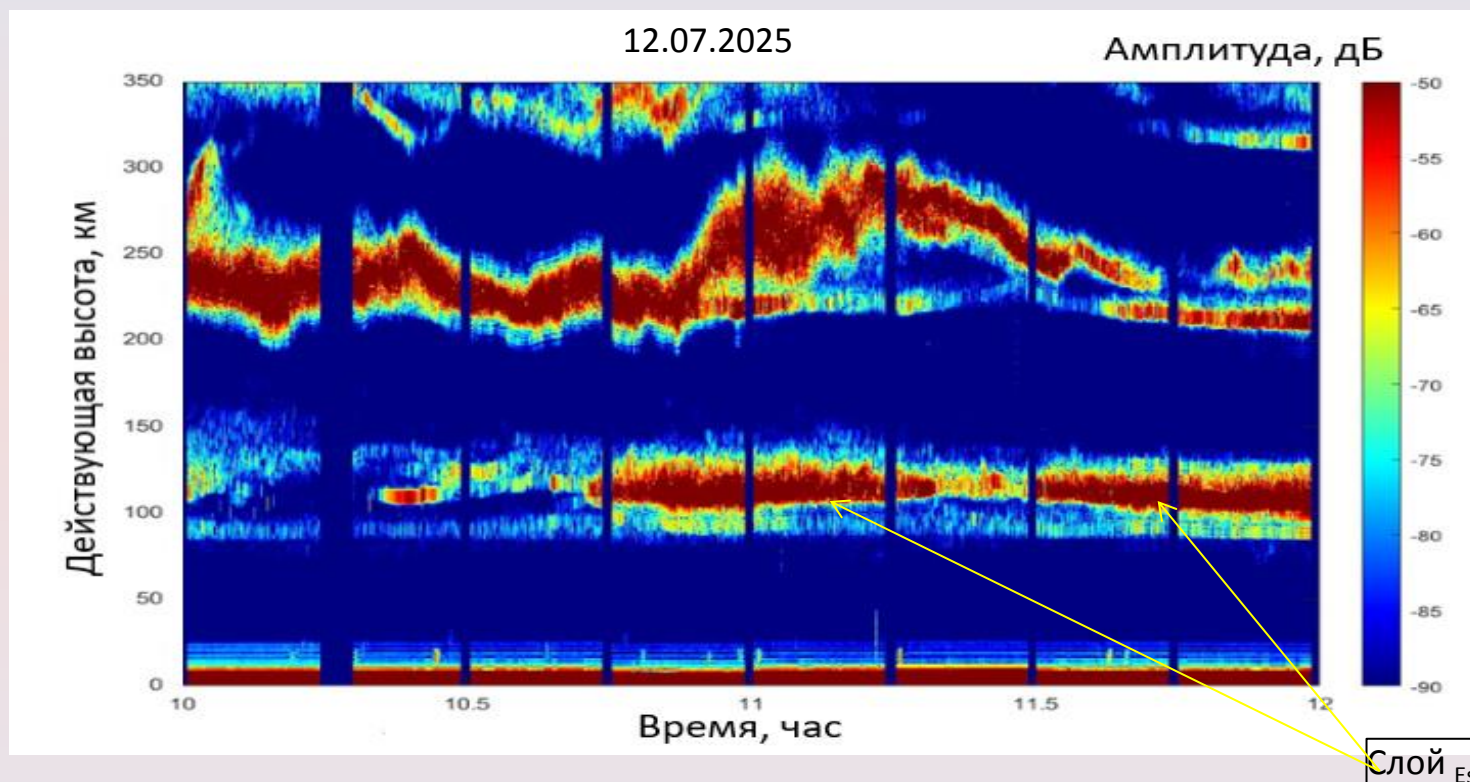
Частота нагрева 5.528 – два передатчика стенда СУРА излучали синфазно с наклоном диаграммы на 12° к югу и в зенит, частота пробных радиоволн 4.300 МГц – излучал третий передатчик. Появление дополнительных сигналов вблизи высоты отражения пробной волны при нагреве 5 мин и 30 с, более интенсивных при вертикальном, а не наклонном зондировании.



Исследование структуры возмущенной области



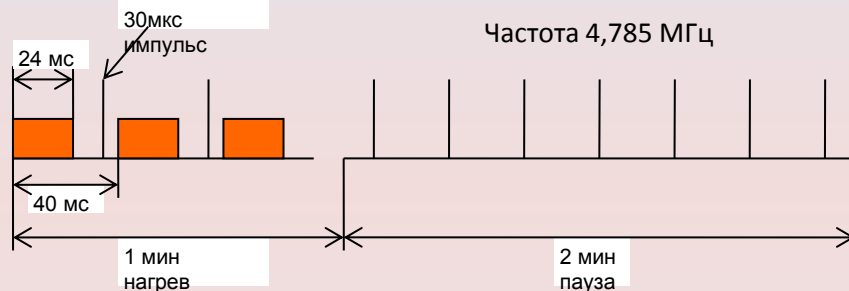
Исследование структуры возмущенной области



Частота нагрева 5.528 – два передатчика стенда СУРА излучали синфазно в зенит, частота пробных радиоволн 4.300 МГц – излучал третий передатчик. Появлению дополнительных сигналов при нагреве в течение 5 минут на высоте вблизи высоты отражения пробной радиоволн мешал спорадический слой E.

Воздействие на слой E_s 14-16 июля 2006 г.

Схема работы стенда СУРА в режиме нагрева и диагностики

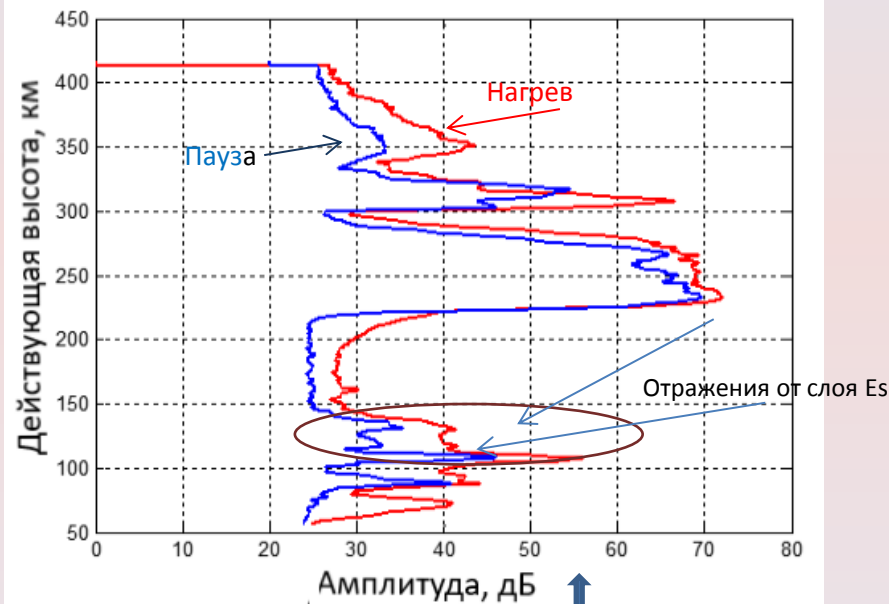


16.07.2006

Амплитуда рассеянного сигнала от кратника E_s



14.07.2006 сеанс 13:04



Эффект увеличения при нагреве всех отражений от ионосферы, включая слой E_s , впервые наблюдался в экспериментах по исследованию ИПН и является безусловно новым. Амплитуда сигнала от верхнего слоя E_s при нагреве заметно (на 10 дБ) больше, чем нижнего, амплитуда от нижнего изменилась мало.

Заключение

1. Влияние слоя E_s амплитуду и время релаксации сигналов, рассеянных ИПН, позволило предложить и реализовать методику оценки масс преобладающих ионов в спорадическом слое E, основанную на увеличении времени релаксации сигнала на высоте слоя.
2. Предложена и реализована методика оценки важных характеристик спорадического слоя E: концентраций металлических ионов в спорадическом слое E и эффективного коэффициента рекомбинации. Для этого используются результаты экспериментального определения профилей электронной концентрации и скорости вертикального движения плазмы, полученные методом резонансного рассеяния радиоволн на ИПН.
3. На основе проведенных экспериментов сделан вывод об улучшении условий образования ИПН в D-области при экранирующем слое E_s . Экспериментально показано, что отражение мощной волны от такого слоя способствует образованию ИПН в D-области,
4. В экспериментах по исследованию возмущенной области ионосферы и ее неоднородной структуры спорадический слой вследствие высокой концентрации электронов частично отражает мощную радиоволну и ухудшает условия образования искусственных неоднородностей.
5. В экспериментах 2025 г. пробные радиоволны обыкновенной поляризации отражались на истинной высоте 130–170 км, что было существенно ниже высоты отражения мощной радиоволны, а также отражались спорадическим слоем E с критической частотой до 4,5 МГц. В результате во время воздействия на ионосферу возрастала амплитуда принятого пробного сигнала на высотах вблизи высоты отражения пробной радиоволны, что наиболее ярко проявлялось в условиях отсутствия спорадического слоя E. В других случаях при появлении слоя E_s значительно возрастала действующая высота отражения пробной волны в F-области. Рассматривается вопрос о влиянии спорадического слоя E на пробные волны и о влиянии нагрева ионосферы на слой E_s .
6. В экспериментах по исследованию ИПН впервые наблюдался эффект увеличения при нагреве амплитуд всех отраженных от ионосферы сигналов, в том числе от спорадического слоя E на 10-15 дБ.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

