



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



**Сporадический слой Е в экспериментах по
воздействию на ионосферу мощным КВ
радиоизлучением**

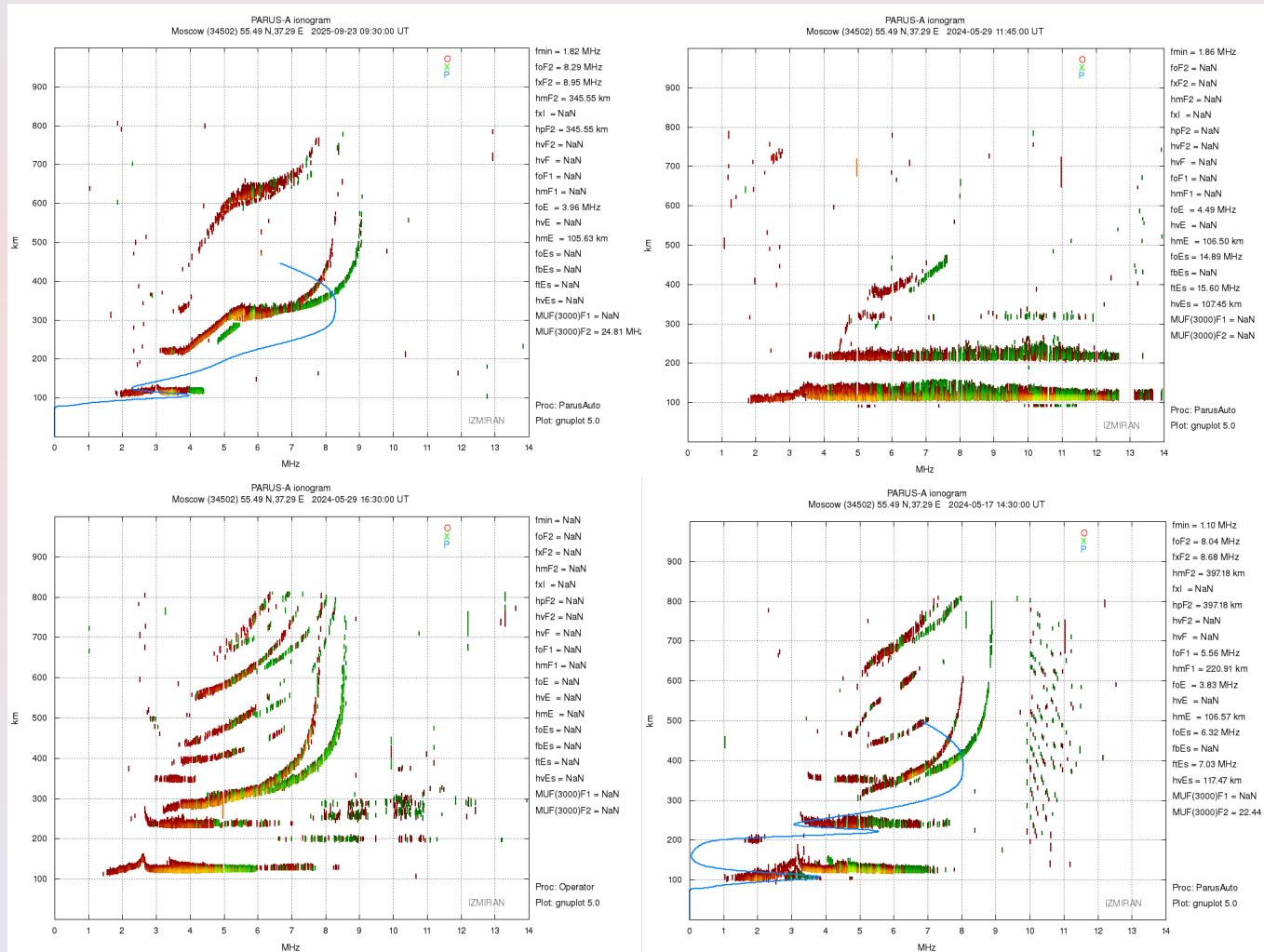
Н.В. Бахметьева, Е.Е. Калинина, И.Н. Жемяков, А. А. Лисов
НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

При поддержке РНФ – грант № 25-27-00031

Сporадический слой E – известные свойства

- электронная концентрация N до $\sim 10^6 \text{ см}^{-3}$; высота слоя $h=90 - 120 \text{ км}$, толщина слоя 300 м–5 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 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 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.

Сporадический слой Е на ионограммах



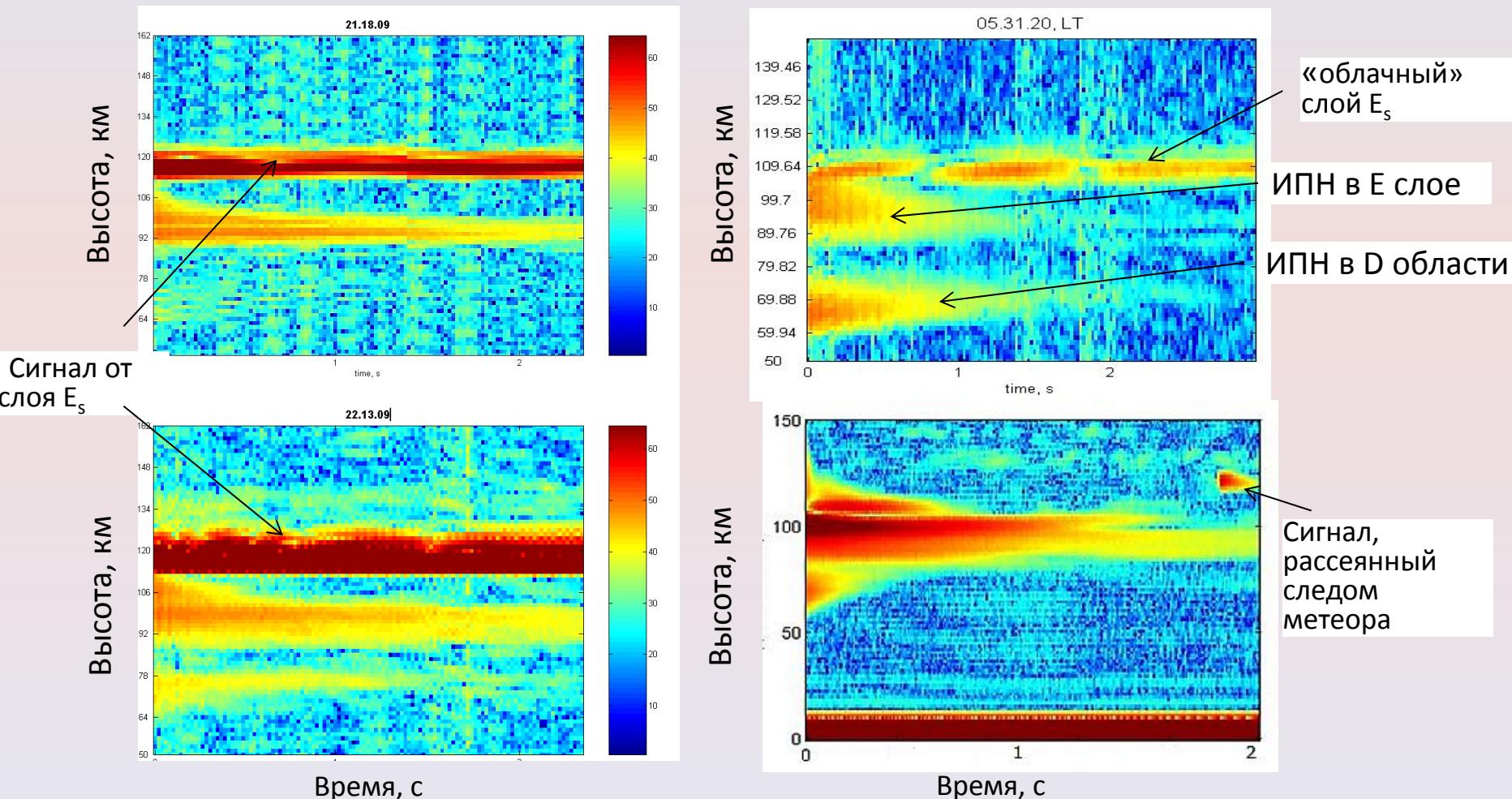
Нагрев ионосферы и спорадический слой Е

Основные задачи

1. Создание искусственных периодических неоднородностей (ИПН) и диагностика нижней ионосферы. Цель экспериментов - определение основных параметров ионосферы и нейтральной атмосферы, влияние спорадического слоя Е на амплитуду и время релаксации ИПН, определение параметров слоя Es.
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 Es на характеристики отраженных и рассеянных сигналов при искусственном возмущении ионосферы.
3. Воздействие на слой Es мощным радиоизлучением с диагностикой ионосферы методами вертикального зондирования и частичных отражений. Цель экспериментов – исследование влияния нагрева ионосферы на спорадический слой Е, 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.

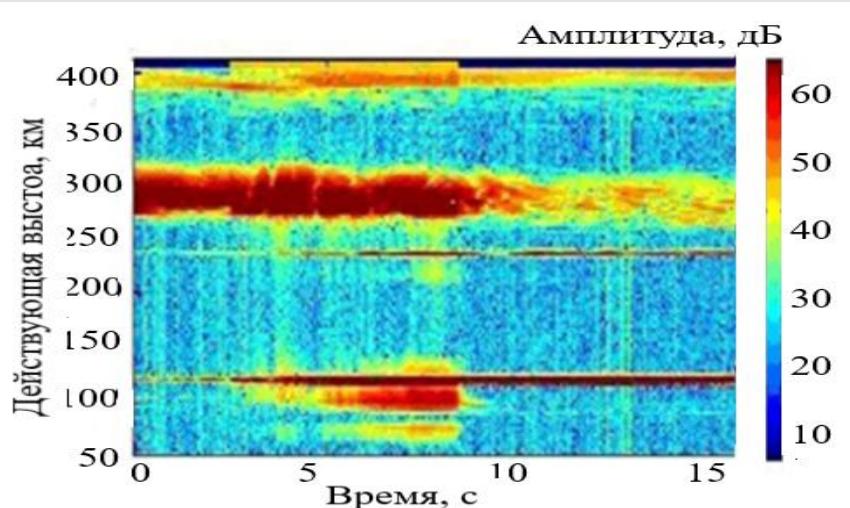
Сporадический слой E и ИПН в нижней ионосфере



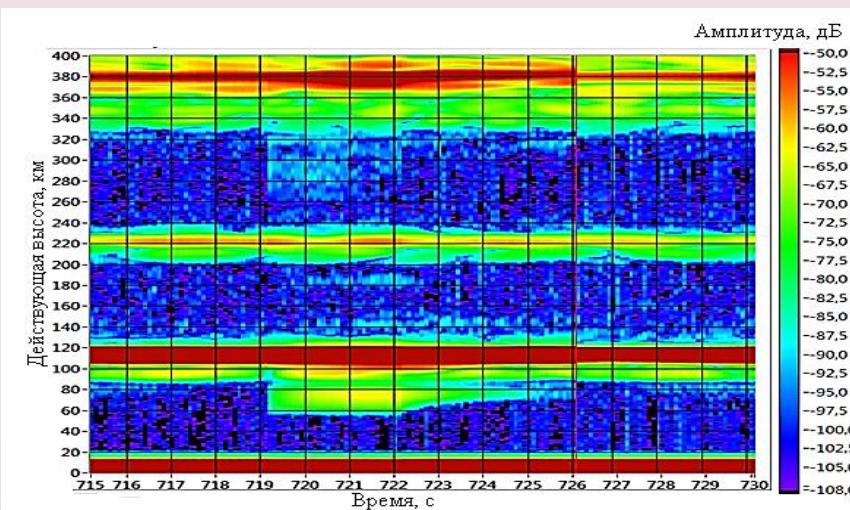
При формировании интенсивного и даже облачного слоя E_s значительно улучшаются условия образования ИПН в E-слое и D-области, в результате растет амплитуда рассеянного сигнала, что позволяет определять многие параметры ионосферы и нейтральной атмосферы с высокой точностью.

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:

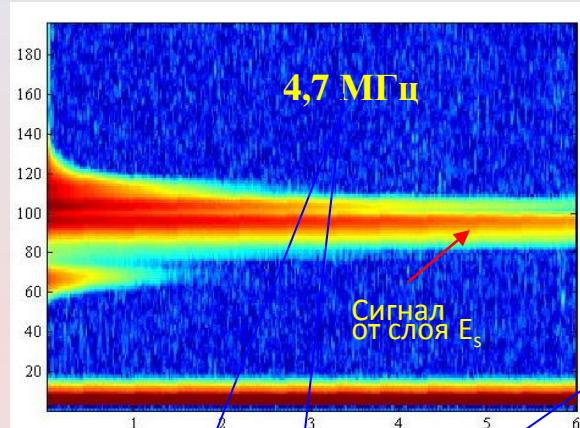
$$\tau = \frac{1}{K^2 D_a} = \frac{M v_{in}}{\kappa(T_{e0} + T_{i0}) K^2} \quad K = 4\pi n / \lambda_0$$

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

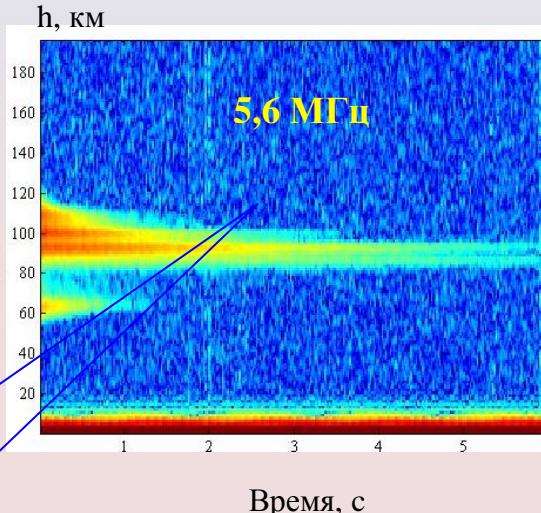
Получены массы ионов: $M_M \approx 39$ и 57 аем, близкие к массам $\text{Ca}^+(40)$ и $\text{Fe}^+(56)$; концентрация всех сортов металлических ионов $N_m \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$

Влияние слоя E_s на параметры рассеянного сигнала

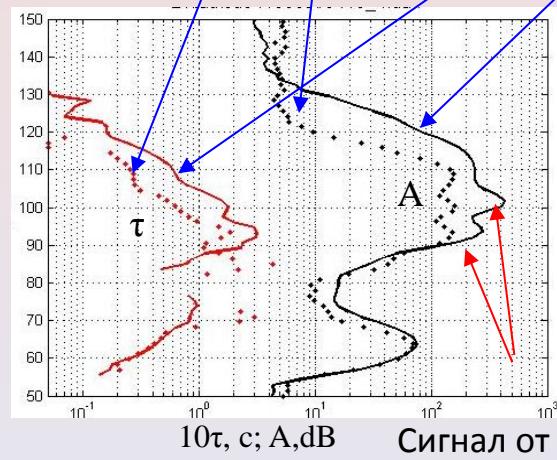
h, KM



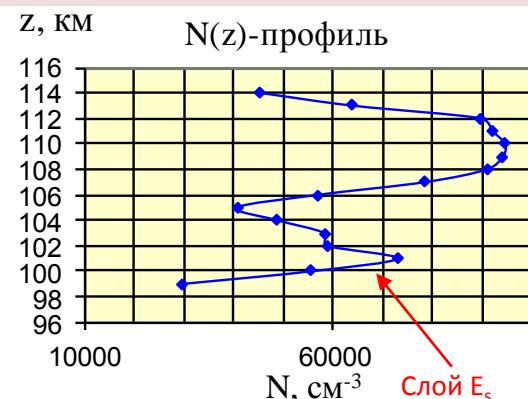
Время, с



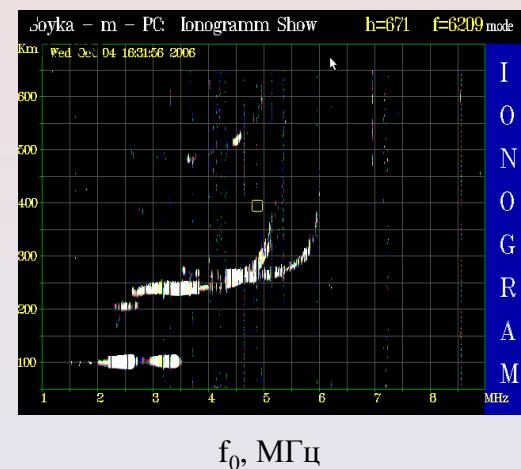
h, km



Сигнал от слоя E_s

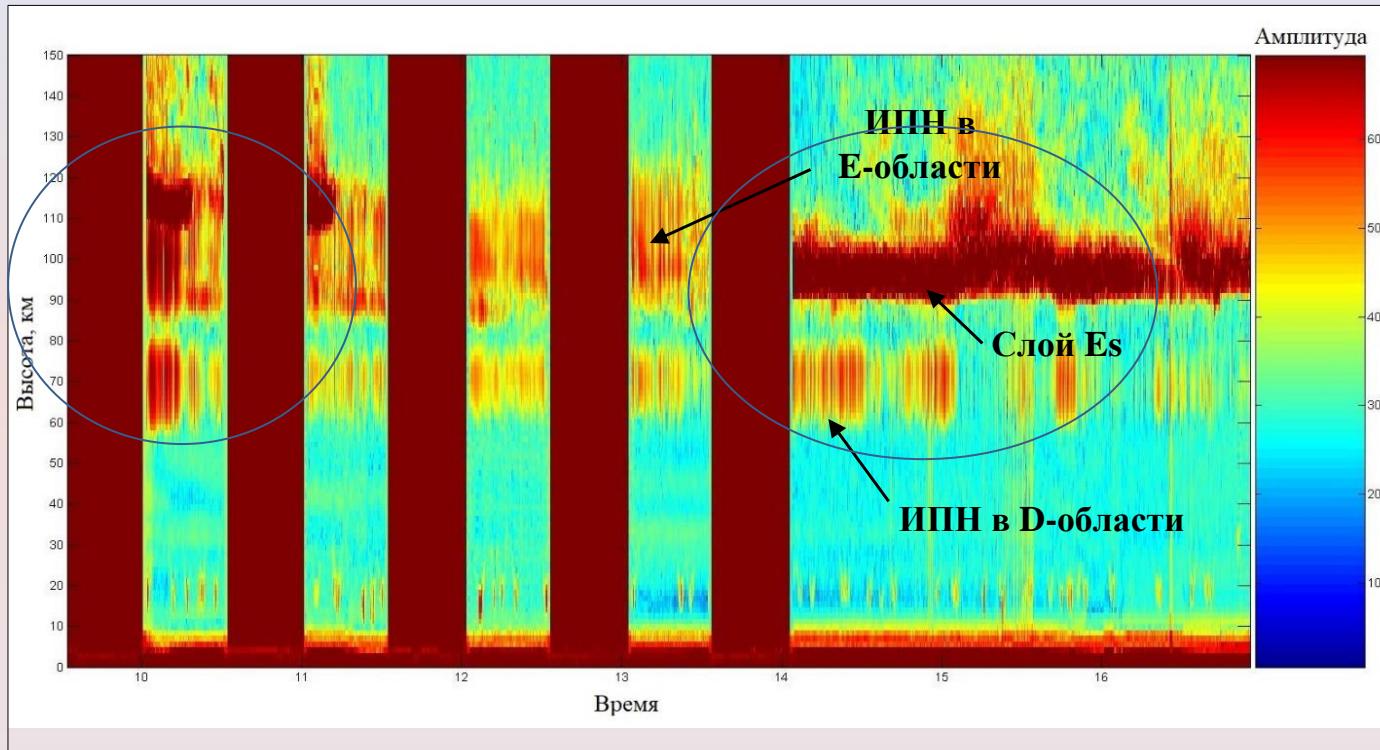


Слой B



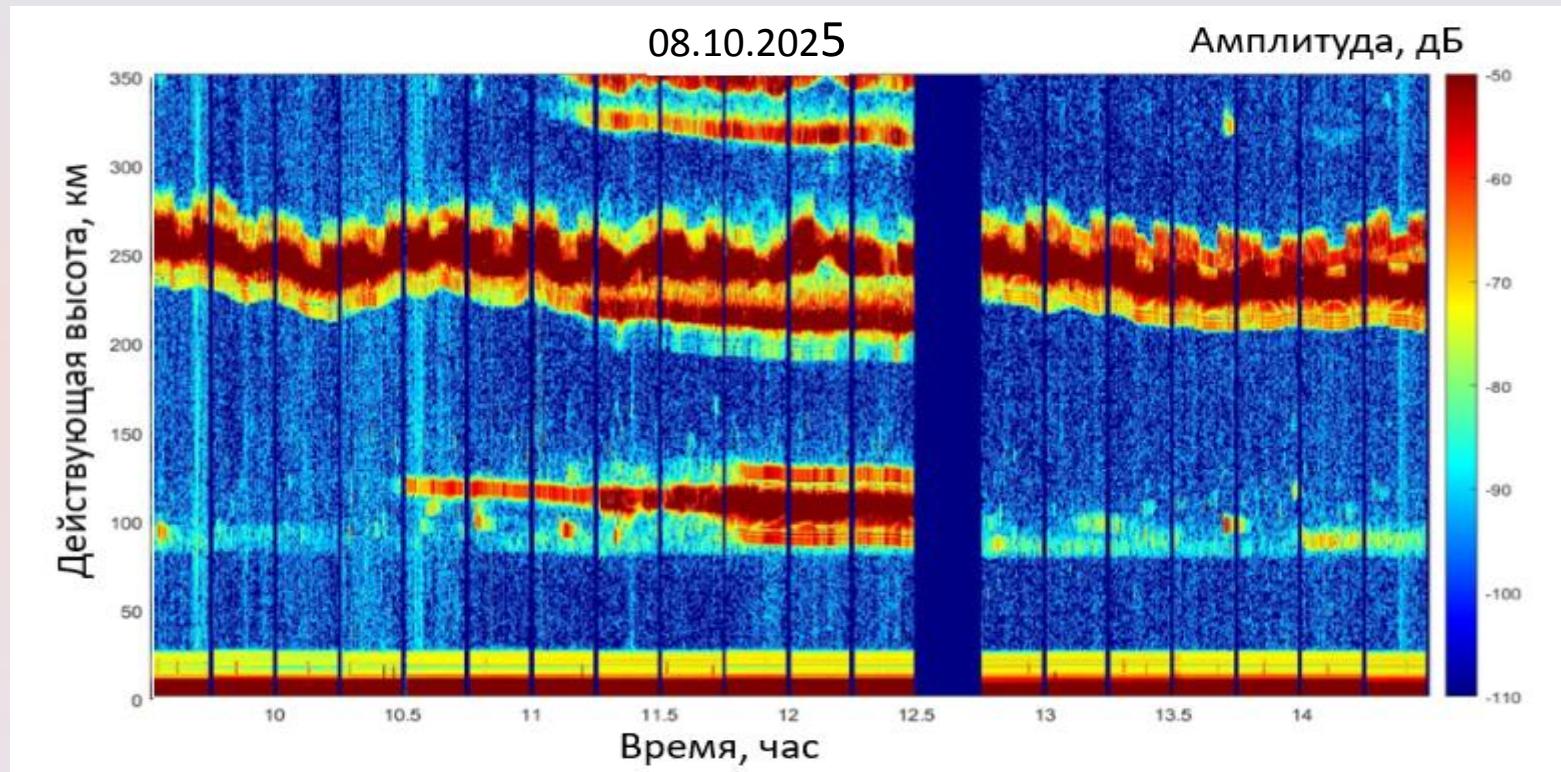
Высотные профили времени релаксации τ и амплитуды A рассеянного сигнала, профиль электронной концентрации $N(z)$, определенный методом ИПН и ионограмма вертикального зондирования с полупрозрачным слоем E_s (нижний ряд слева направо).

Слой E_s при длительных нагревах ионосферы 12.09.2019

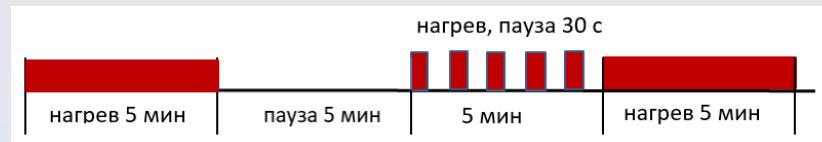


В сентябре 2019 г. проводился эксперимент по измерению спектра излучения атмосферы в линии озона при воздействии мощного КВ радиоизлучения стенда СУРА. В течение каждого часа: 30 минут – непрерывный нагрев, 30 минут – пауза в работе стенда и работа в режиме диагностики ионосферы методом ИПН, измерение 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.

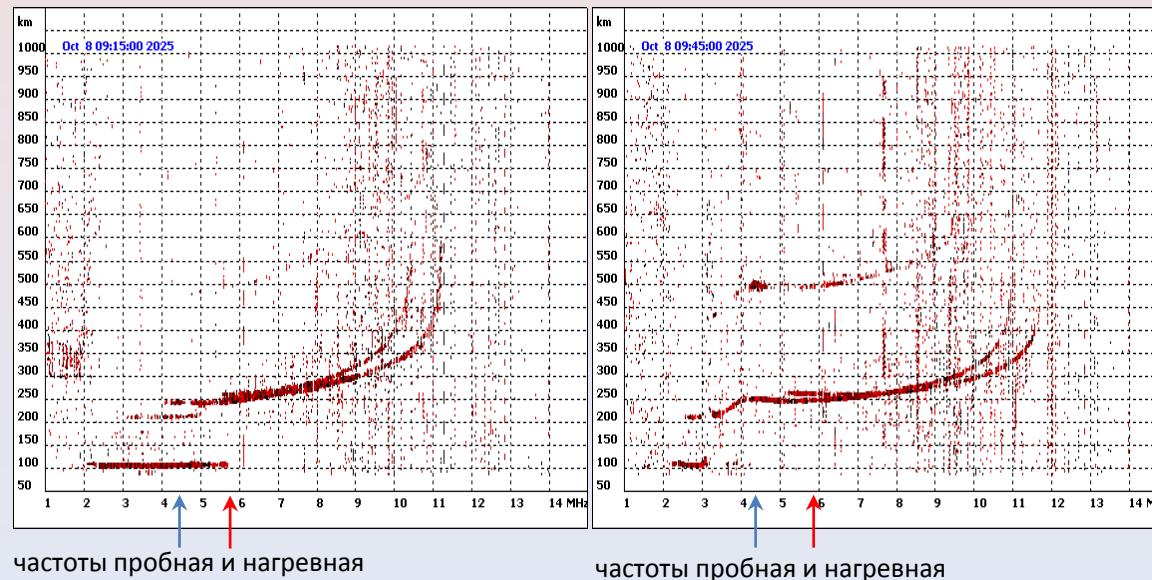
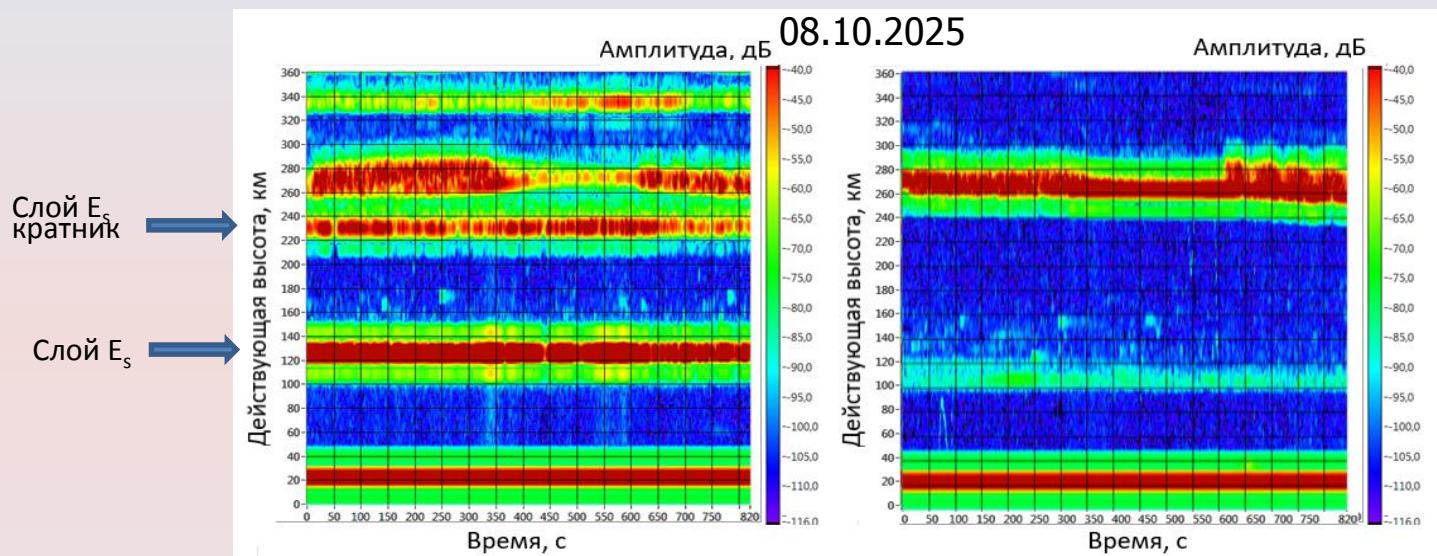
Исследование структуры возмущенной области



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.

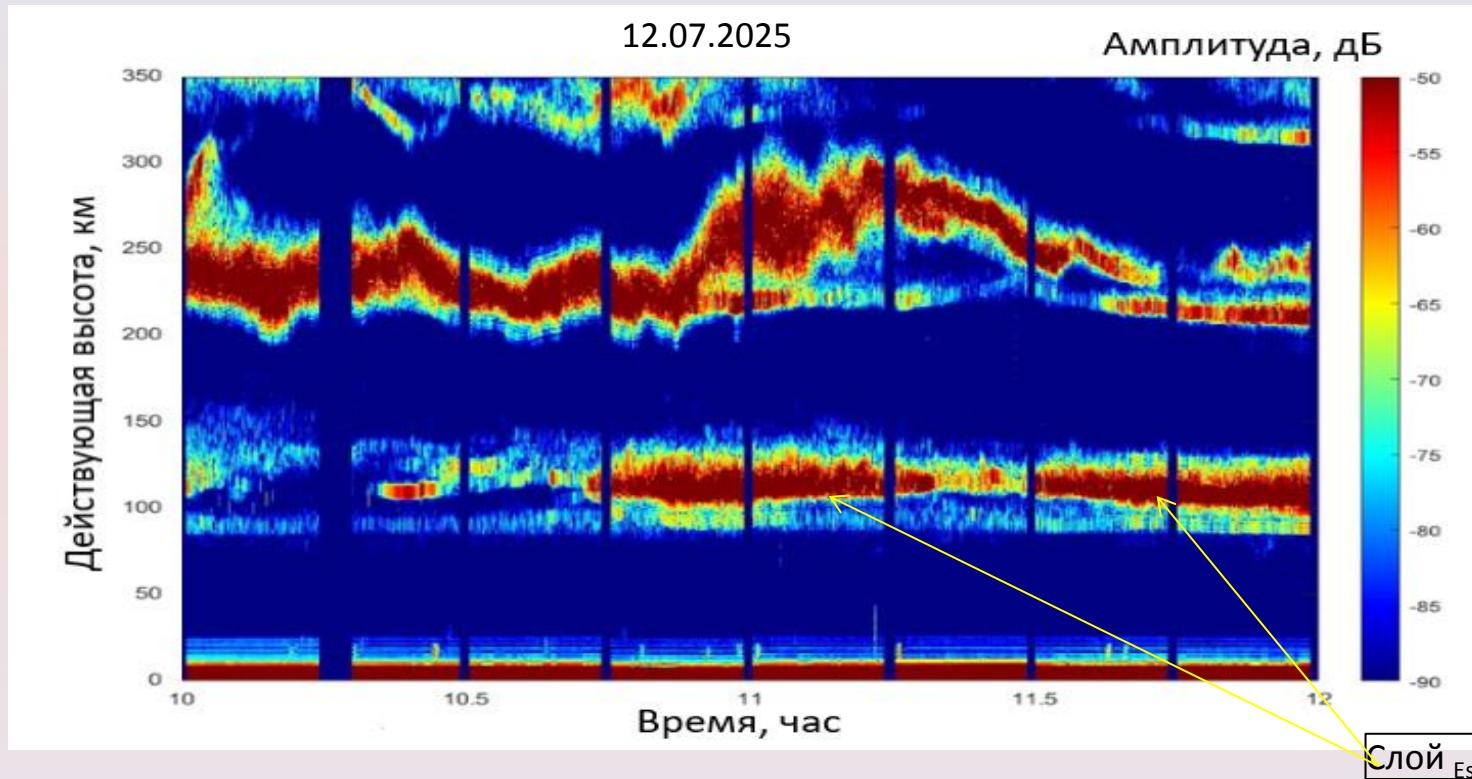


Исследование структуры возмущенной области



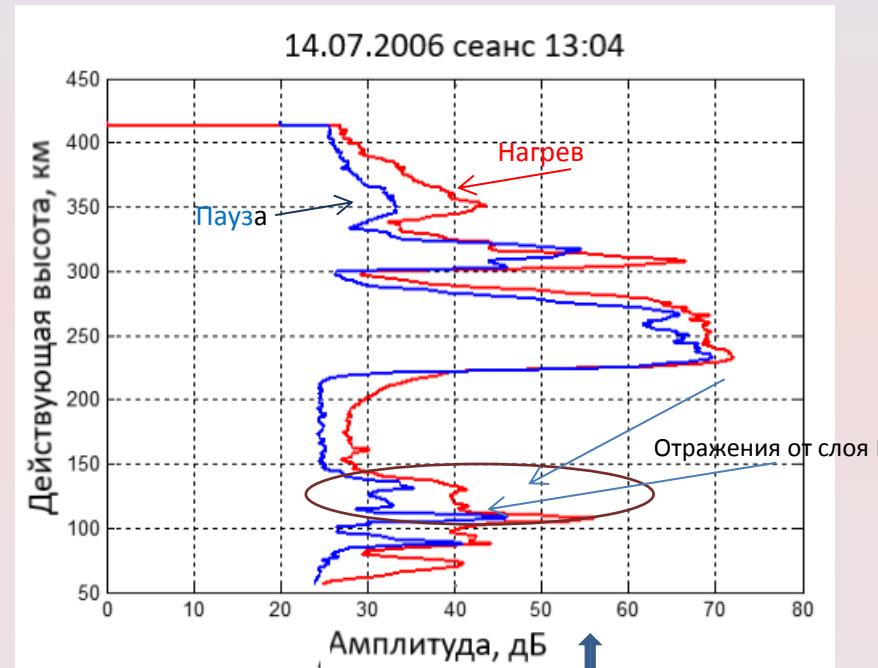
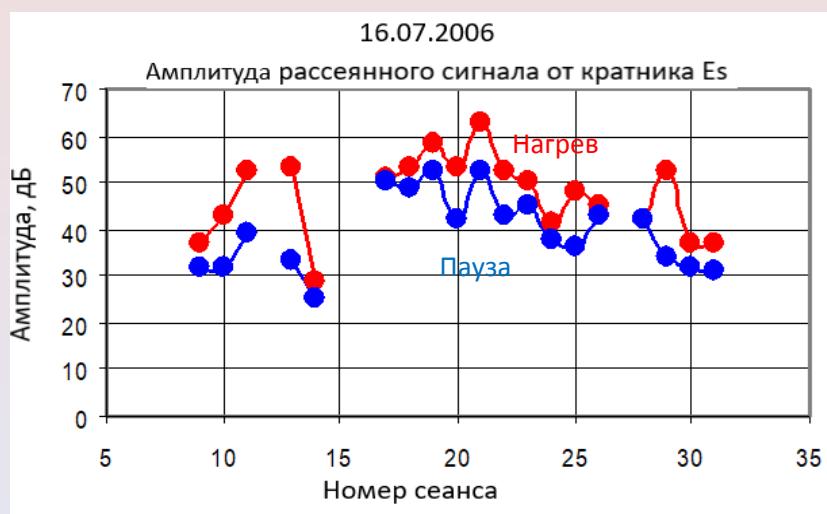
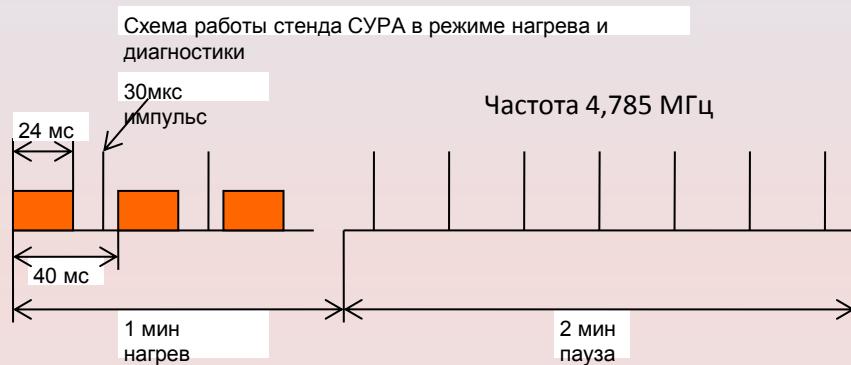
Ионограммы вертикального зондирования со спорадическим слоем E (слева) и без него (справа).

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 радиоволны мешал спорадический слой E.

Воздействие на слой E_s 14-16 июля 2006 г.



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!

