

**Физика взаимодействия
мощной КВ радиоволны с
ионосферной плазмой.
Искусственная ионосферная
турбулентность.**

Фролов В.Л.

**НИРФИ-ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Н.Новгород, Россия**

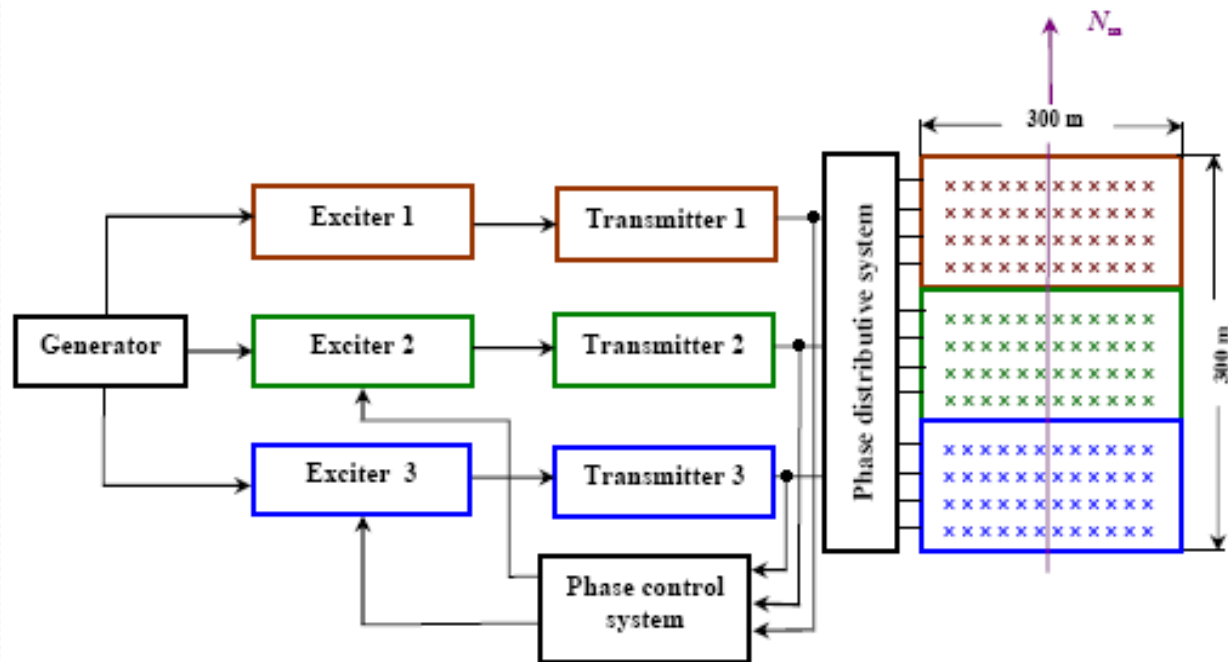
Иркутск - 2019

СОДЕРЖАНИЕ ДОКЛАДА:

- 1. Характеристики стенда СУРА.**
- 2. Стадии развития ИИТ вблизи высоты отражения ВН О-поляризации.**
- 3. Пространственная структура ВО ионосферы.**
- 4. Эффект магнитного зенита.**
- 5. Генерация ИРИ.**
- 6. Возбуждение токов в ВО ионосферы.**
- 7. Свойства плазменных возмущений, возбуждаемых во внешней ионосфере.**
- 8. Характеристики ПИВ, возбуждаемых при модификации ионосферы.**
- 9. Стимуляция высыпаний высокоэнергичных электронов из радиационного пояса Земли.**

Характеристики стенда СУРА

Стенд начал
работать в 1981 г.



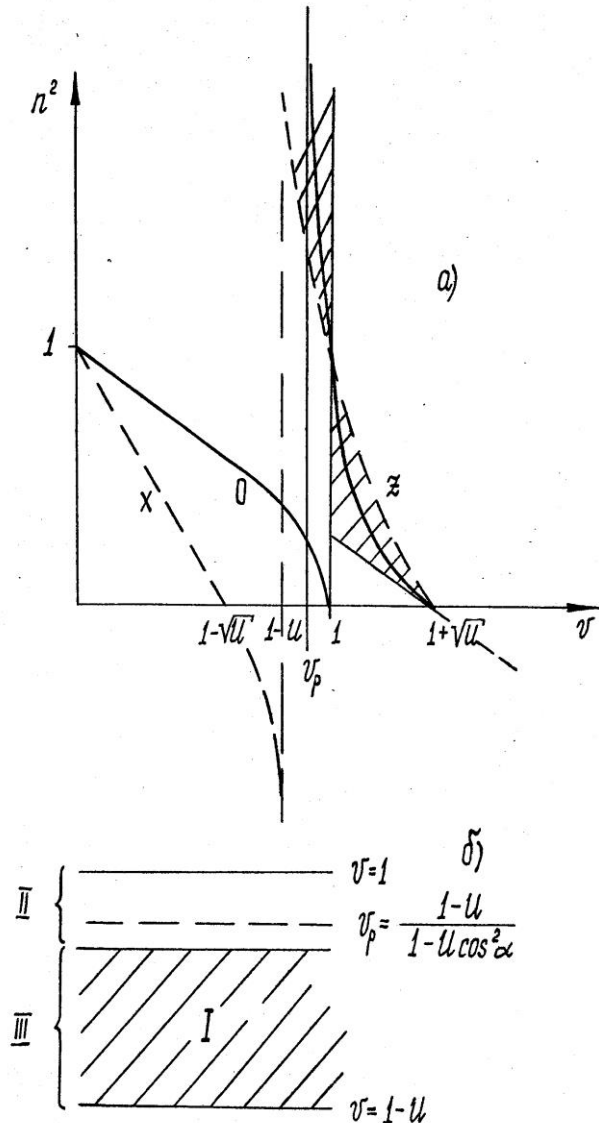
- $f_0 = 4.3 - 9.5$ МГц,
- $P_0 = 3 \times 250$ кВт = 750 кВт,
- 12×12 широкополосных скрещенных диполей, размещенных на площади 300 м \times 300 м,
- $P_{\text{eff}} = 80 - 280$ МВт,
- O и X поляризации,
- возможность сканирования лучом антенны в пределах $+40^\circ \div -40^\circ$ от вертикали.
- 3 модуля стенда могут работать независимо каждый на своей частоте, поляризации, со своей мощностью и со своим временным режимом или в когерентном режиме излучения.



Излучающая антенна стенда СУРА



Дисперсионные кривые ЭМ-волн в магнитоактивной плазме



Условия плазменных резонансов для КВ волн О-поляризации:

$$1 - v - u + vu \cdot \cos^2 \alpha = 0,$$

$$0 \leq \alpha \leq \pi/2 \rightarrow 1 - u \leq v_{res} \leq 1,$$

$$v = (\omega_0/\omega)^2; u = (\omega_H/\omega)^2$$

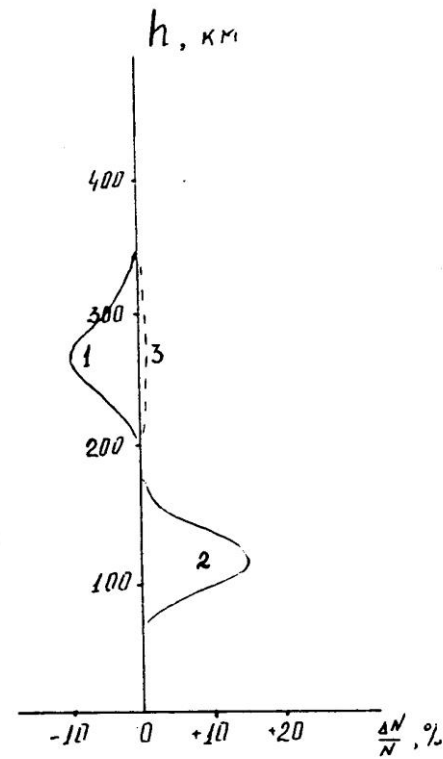
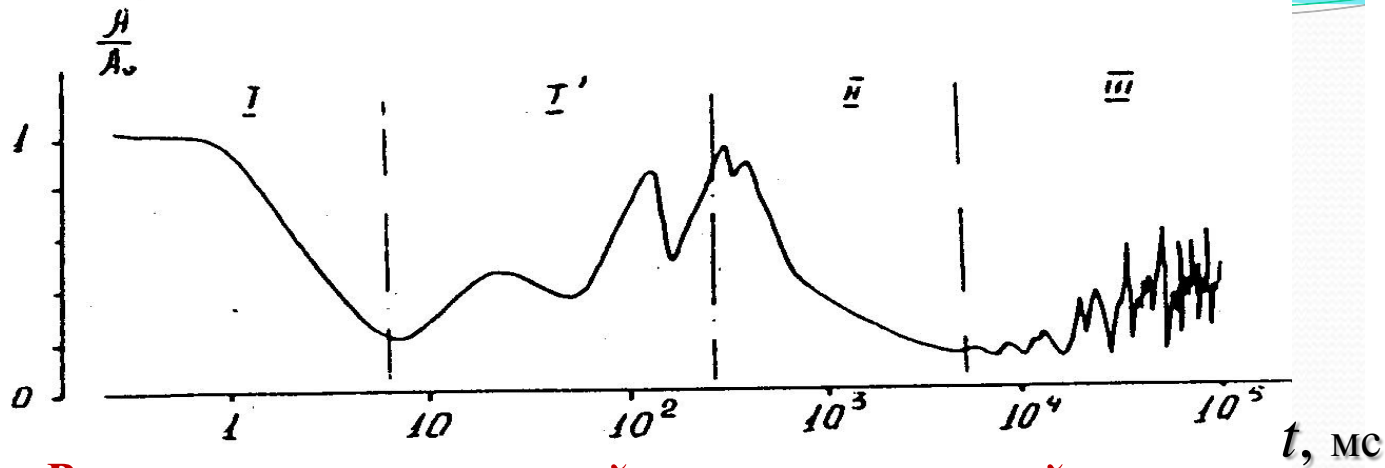
- I) $1 - u \leq v \leq 1$ — область существования плазменных волн;**
- II) область квазипоперечного распространения волн О-поляризации ($\mathbf{k} \perp \mathbf{H}_0$), область развития СПН;**
- III) область квазипродольного распространения волн О-поляризации ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{H}_0$), область развития ТПН.**

Стадии развития ИИТ

- I) Развитие стрикционной параметрической неустойчивости ($t \approx 1 - 100$ мс): поглощение мощной радиоволны, генерация ленгмюровских плазменных колебаний вблизи высоты отражения ВН, ускорение электронов до сверхтепловых энергий, генерация метровых неоднородностей, появление квазипериодических осцилляций амплитуды отраженной от ионосферы пробной радиоволны.
- II) Развитие тепловой параметрической неустойчивости ($t \approx 0.3 - 10$ с): поглощение мощной радиоволны, генерация верхнегибридных плазменных колебаний, генерация МИИН с размерами $l_{\perp} \leq 30 - 50$ м, ускорение электронов до сверхтепловых энергий.
- III) Развитие самофокусирующей неустойчивости ($t \approx 5 - 30$ с): рассеяние мощной радиоволны, генерация СИИН с размерами $l_{\perp} \approx 0.1 - 1$ км.
- IV) Генерация КИИН с размерами $l_{\perp} > 1.0$ км, формирование дефокусирующей линзы на высотах $h \approx 130 - 150$ км с $\Delta N_e > 0$ и фокусирующей линзы вблизи максимума F_2 -области ионосферы с $\Delta N_e < 0$ (t от нескольких десятков секунд до нескольких минут).

Нагрев электронов плазмы на всех стадиях развития ИИТ.

Стадии развития ИИТ



I) Развитие стрикционной параметрической неустойчивости.

II) Развитие тепловой параметрической неустойчивости (генерация МИИН с размерами $l_{\perp} \approx 1 - 50$ м).

III) Развитие самофокусирующей неустойчивости (генерация СИИН с размерами $l_{\perp} \approx 0.1 - 1$ м).

IV) Развитие КИИН с размерами l_{\perp} в несколько километров.

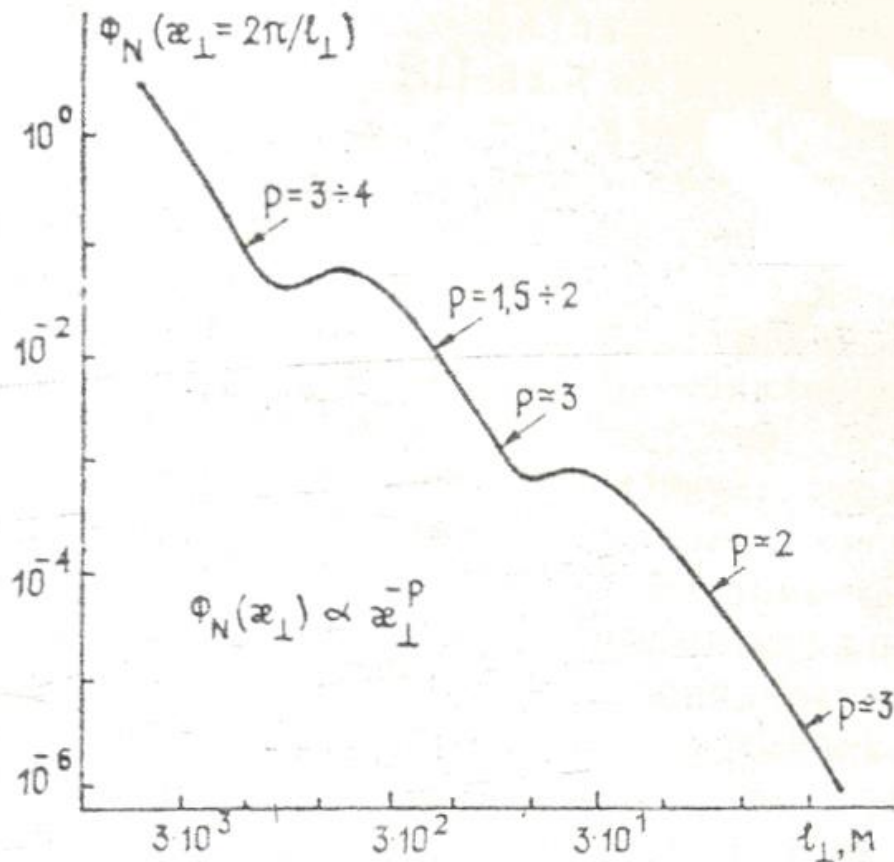
Нагрев электронов плазмы на всех стадиях, формирование дефокусирующей линзы на высотах $h \approx 130 - 150$ км с $\Delta N_e > 0$ (в дневных условиях) и фокусирующей линзы вблизи максимума F_2 -области ионосферы с $\Delta N_e < 0$ и дакта на высотах внешней ионосферы.

1 – фокусирующая линза,

2 – дефокусирующая линза (днём),

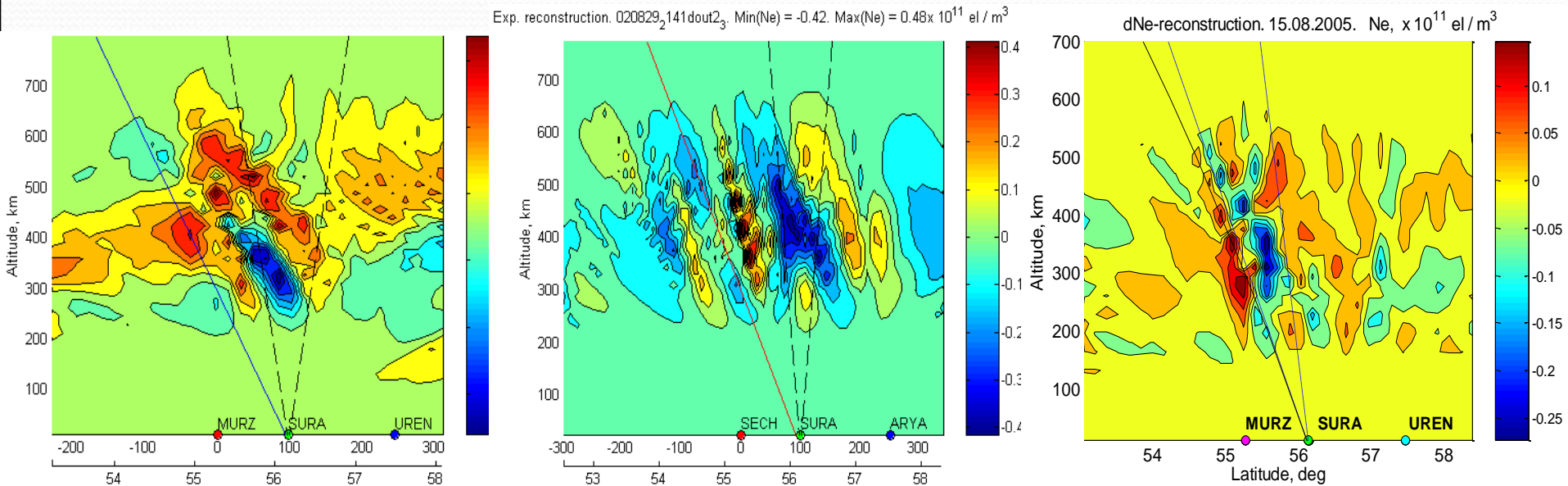
3 – изменение N_e при учете дополнительной ионизации, формирование искусственных слоёв.

Спектральные характеристики ИИН, возбуждаемых при развитии ТПН около высоты отражения мощной радиоволны в результате развития ТПН (РН)



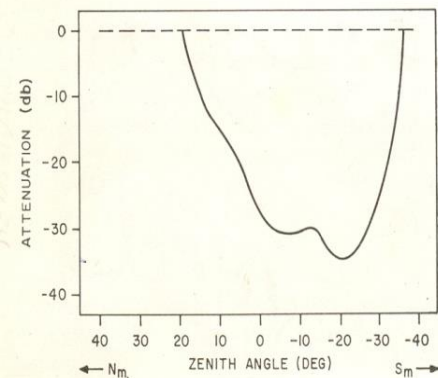
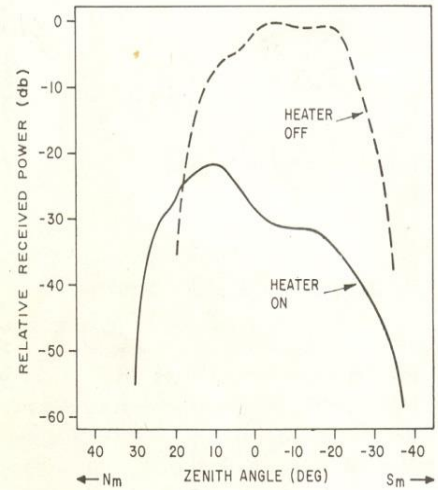
Эти результаты были получены в вечерней и ночной ионосфере для частот ВН 4.3 – 5.8 МГц вне гирогармонических резонансов. Следует отметить, что в экспериментах по модификации плазмы мощными радиоволнами особое место занимает область двойного гирорезонанса ($f_{ВН} \approx 2f_{ce}$), в которой наблюдается наиболее интенсивное развитие ИИТ.

Пространственная структура ВО ионосферы (по данным низкоорбитальной радиотомографии)

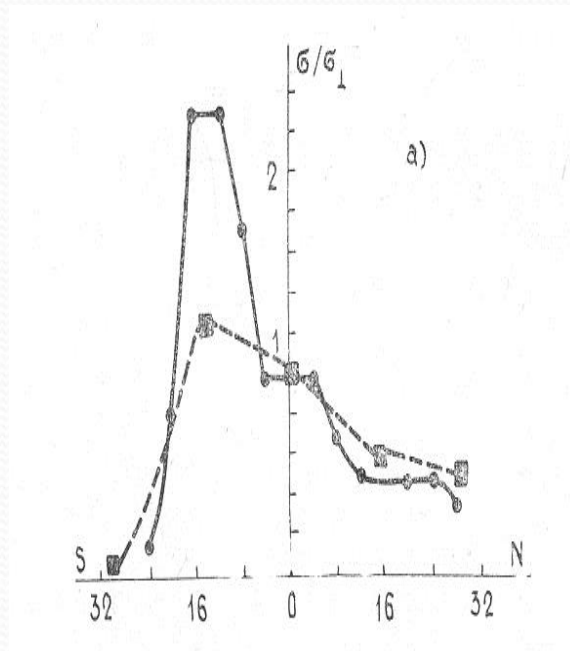


1. Наиболее сильные возмущения плотности плазмы километровых масштабов наблюдаются в вечерние и ночные часы; только слабые возмущения регистрируются в дневной ионосфере.
2. Величина возмущений измеряется в пределах от + 20% до – 30%. Они регистрируются на расстоянии ~ 500 км в N-S направлении и занимают высотный интервал от E-области до $h \geq 1000$ км.
3. Имеет место влияние эффекта «магнитного зенита».

Эффект «магнитного зенита»

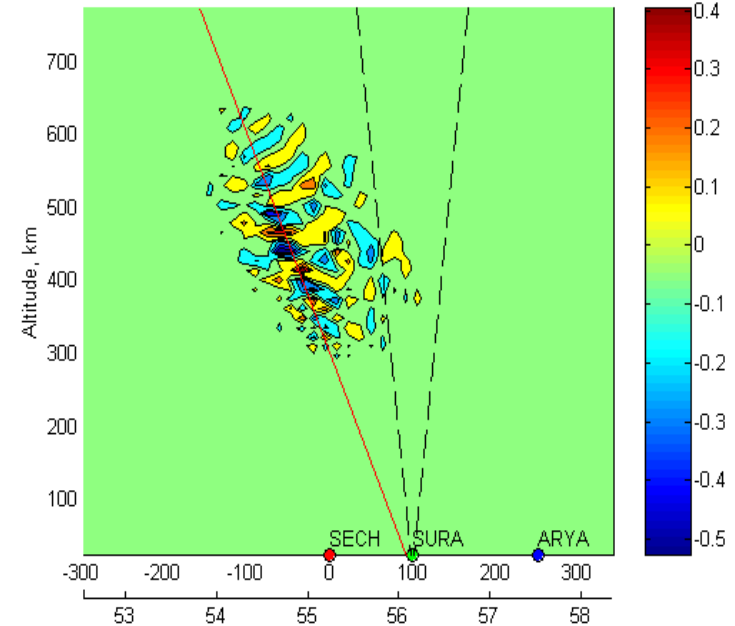


$$l_{\perp} \approx 30 \text{ м}$$



$$l_{\perp} \approx 3 \text{ м}$$

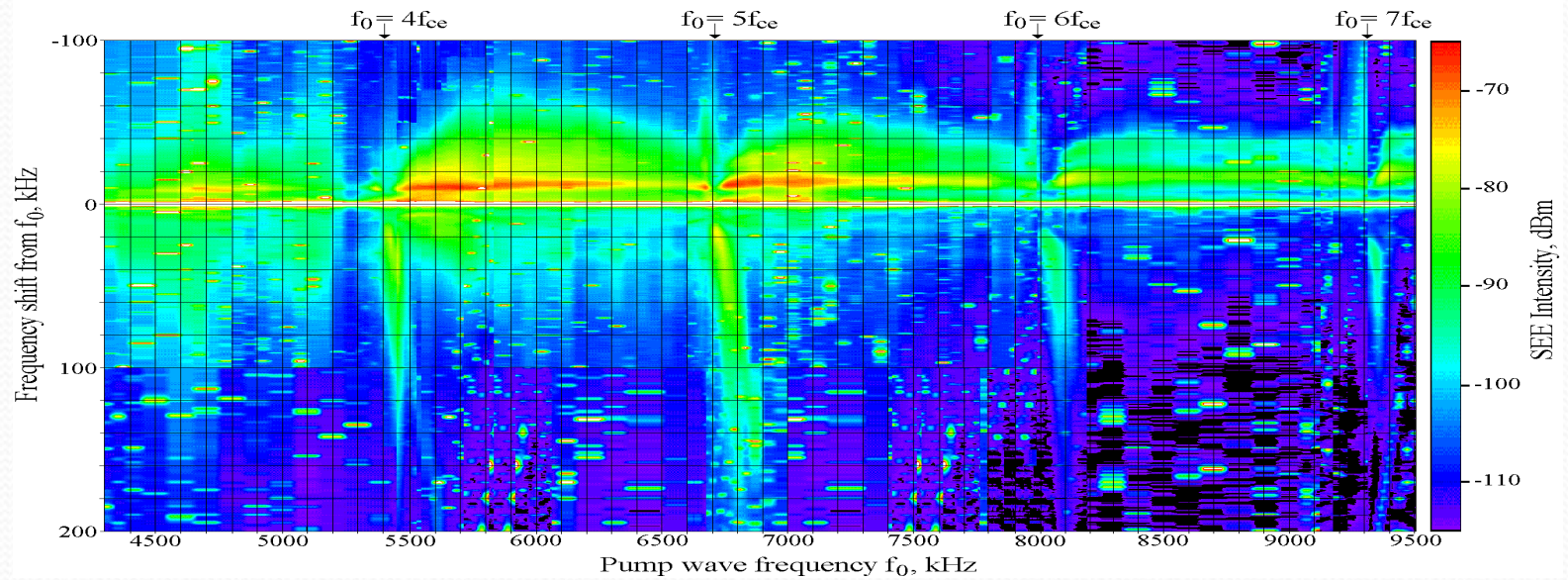
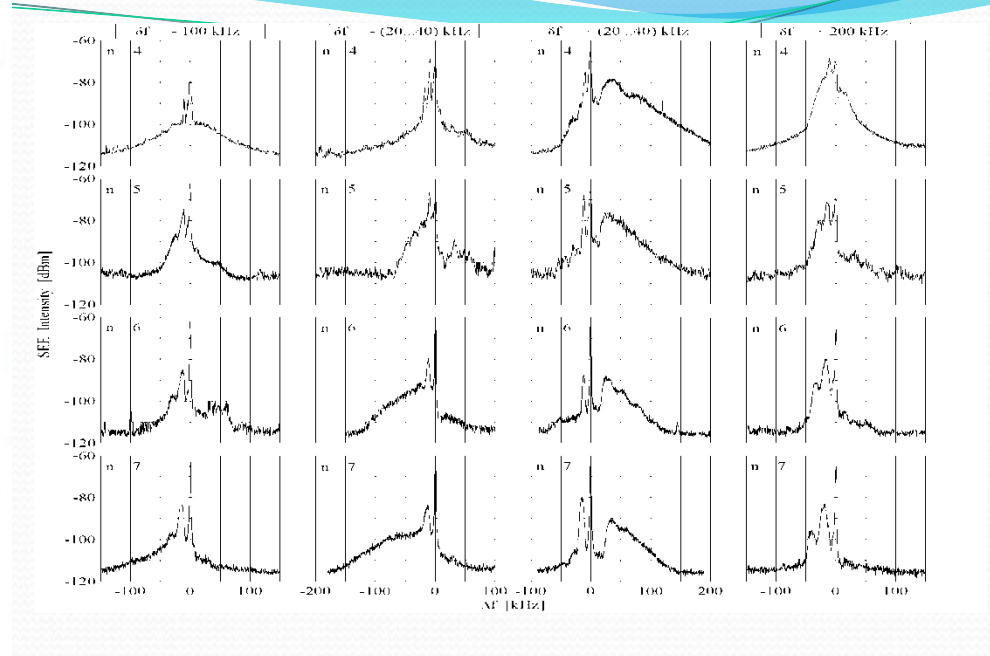
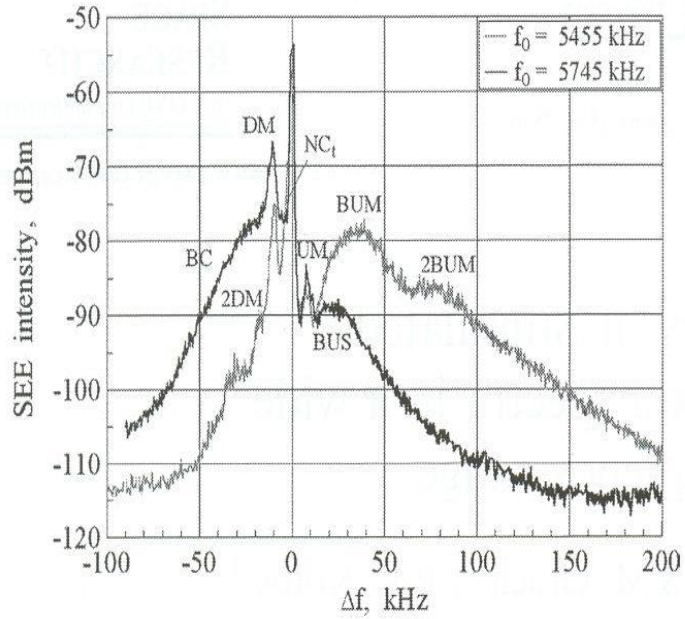
Exp. reconstruction. 020826_200dout5_1. Min(Ne) = -0.53. Max(Ne) = $0.52 \times 10^{11} \text{ el} / \text{m}^3$



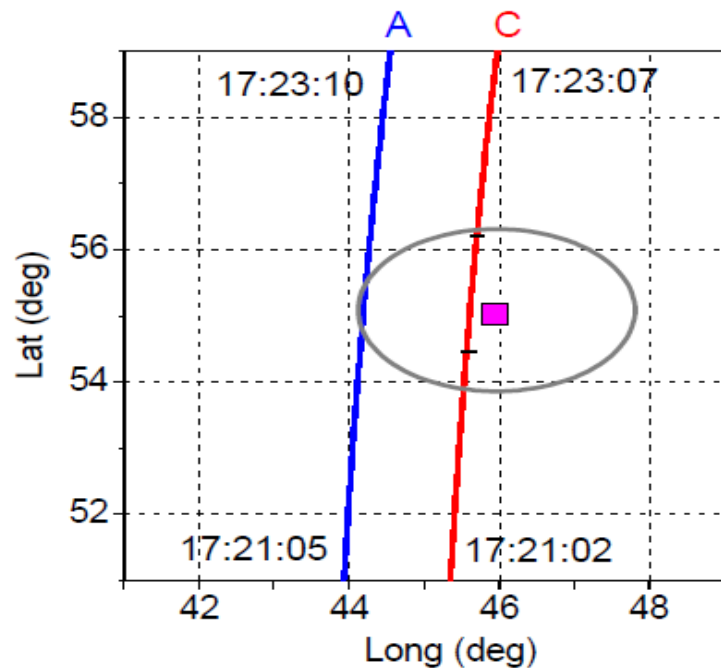
$$l_{\perp} \approx 10 \text{ км}$$

Эти данные ясно демонстрируют, что при излучении мощной радиоволны почти вдоль силовых линий геомагнитного поля ИИН разных масштабов имеют наибольшую интенсивность. Для стенда СУРА наклон составляет $\theta \approx 12 - 14^\circ$ к югу от вертикали.

Искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ)



Генерация электрических токов в ВО ионосферы



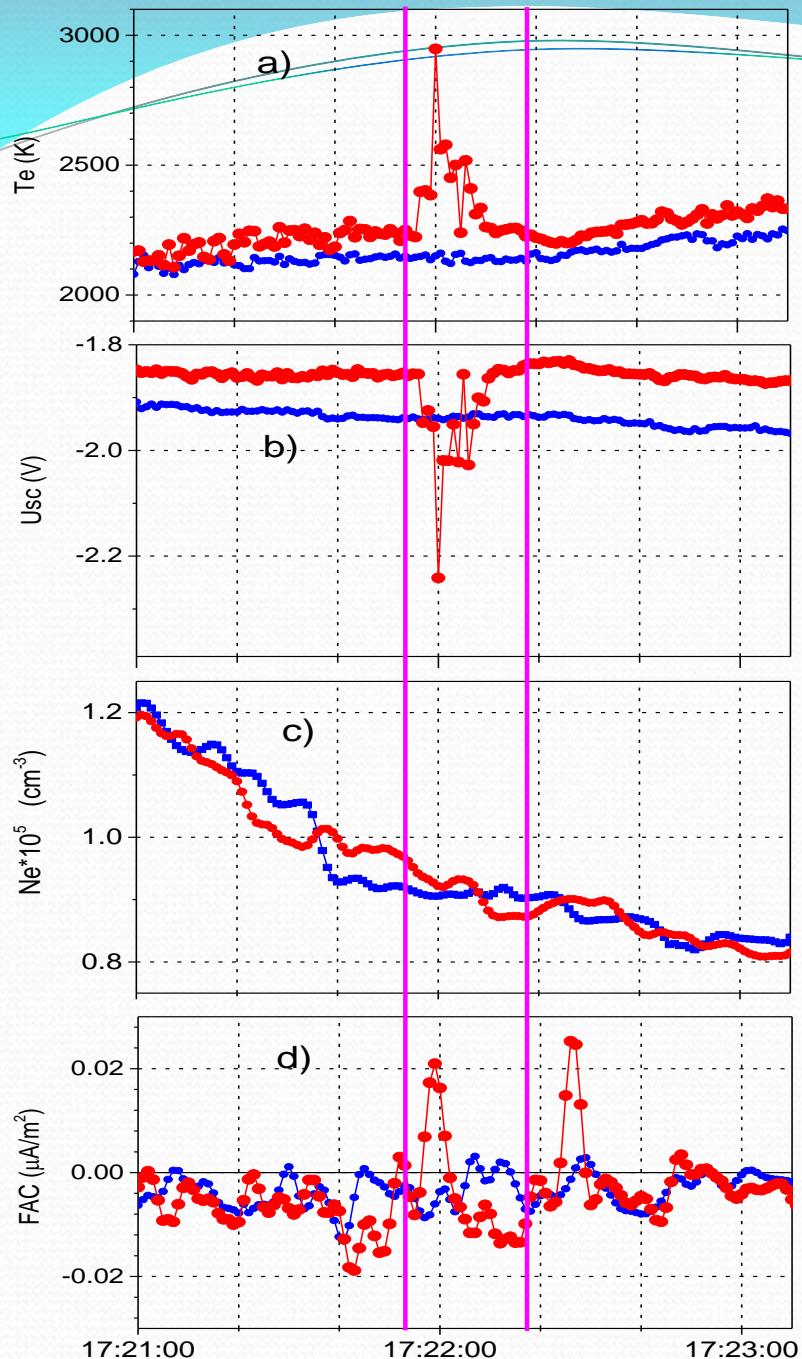
Эксперименты выполнялись со спутниками SWARM, когда один из них (С) пролетал близко к центру возмущенной магнитной силовой трубки, опирающейся на область с сильно развитой турбулентностью, а второй (А) пролетал по краю возмущенной трубки.

Высота орбит обоих ИСЗ равна 450 км, что соответствовало области высот между областью формирования фокусирующей линзы на высотах $h \approx 200 - 400$ км и внешней ионосферы ($h \geq 500$ км).

Хорошо видно, что в области наибольшего разогрева плазмы наблюдается ток, втекающий в ионосферу сверху с $J \approx 0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$, по краям которого регистрируются вытекающие токи. Такая картина соответствует случаю униполярной диффузии при развитии неоднородностей плотности плазмы. Некоторый сдвиг этих токов к югу от центра трубки связан с эффектом «магнитного зенита».

Севернее возмущенной трубки регистрируется еще один втекающий ток (в 200 км от первого), появление которого не находит своего подтверждения в других измерениях характеристик ИИТ.

По измерениям на EISCAT-heating было установлено, что уходящие во внешнюю ионосферу ускоренные электроны также приводят к формированию втекающего продольного тока с $J \approx 0.06 \mu\text{A}/\text{m}^2$ (ток больше, но там — авроральная ионосфера и более высокие мощности ВН).



Исследование свойств плазменных возмущений на высотах $h \approx 700$ км с помощью французского микро ИСЗ DEMETER (2005 – 2010 гг.)

(*Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions*)

ИСЗ летал на высоте 660 км и был оснащен плазменным анализатором, ионным спектрометром, анализатором энергичных частиц, ленгмюровским зондом и измерителями эл-м полей.

Измерялись амплитуды электрических и магнитных полей:

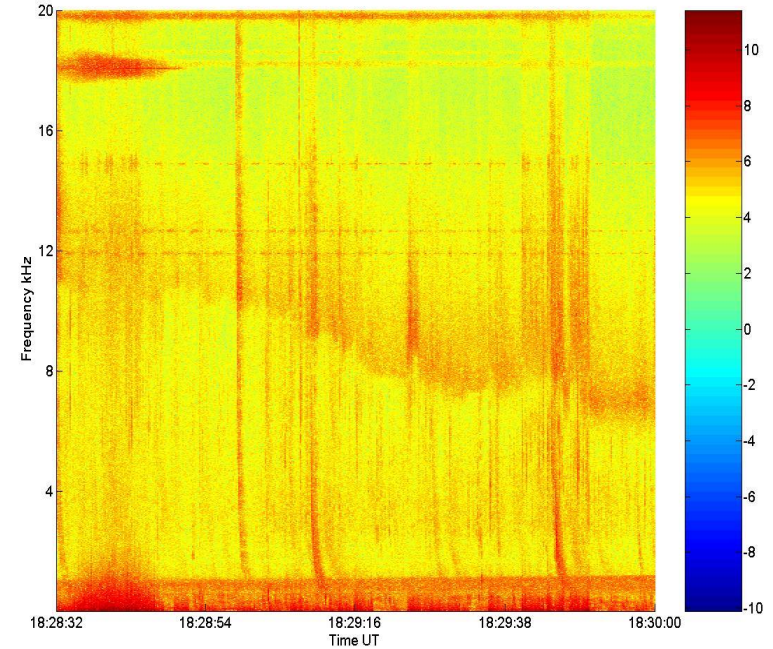
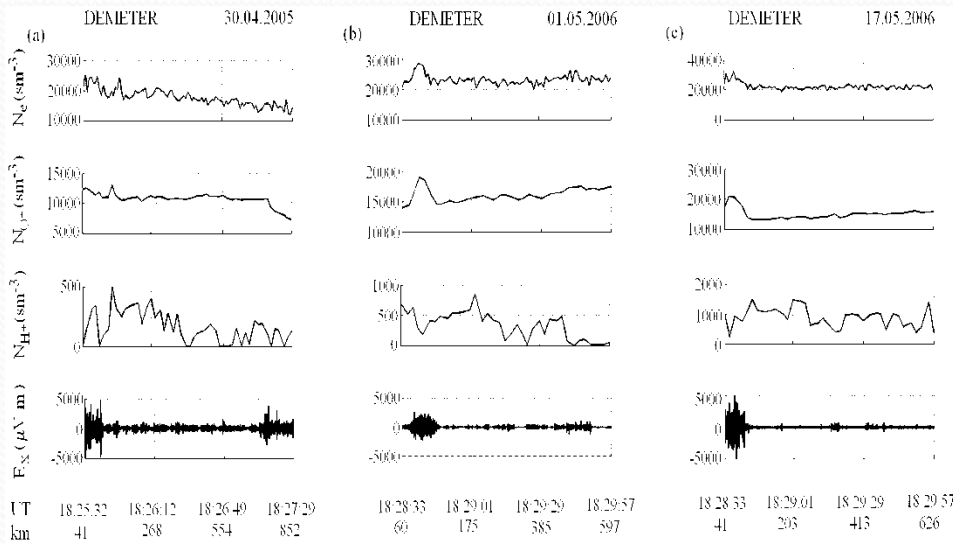
a) in the *survey mode*:

- амплитуд трёх электрических компонент до 15 Гц,
- спектры двух компонент (1В + 1Е) до 20 кГц,
- спектры одной электрической компоненты до 3.5 МГц.

b) in the *burst mode*:

- амплитуд трёх электрических компонент до 15 Гц,
- спектры двух компонент (1В + 1Е) до 20 кГц,
- спектры одной электрической компоненты до 3.5 МГц,
- амплитуды шести компонент (3В + 3Е) до 1.25 kHz,
- амплитуды двух компонент (1В + 1Е) до 20 kHz,
- амплитуды одной компоненты электрического поля до 3.5 MHz.

Некоторые результаты экспериментов СУРА-DEMETER (+DMSP).



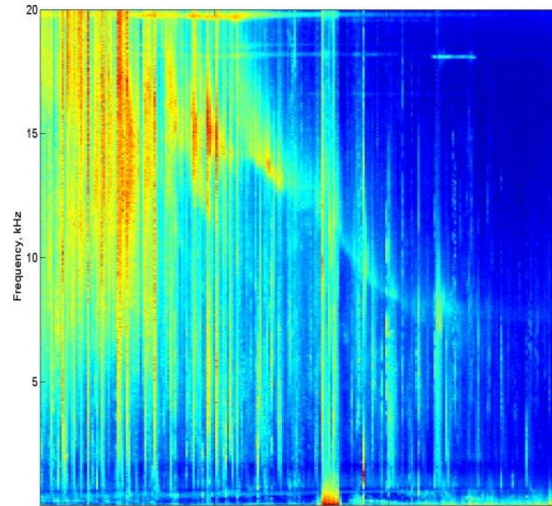
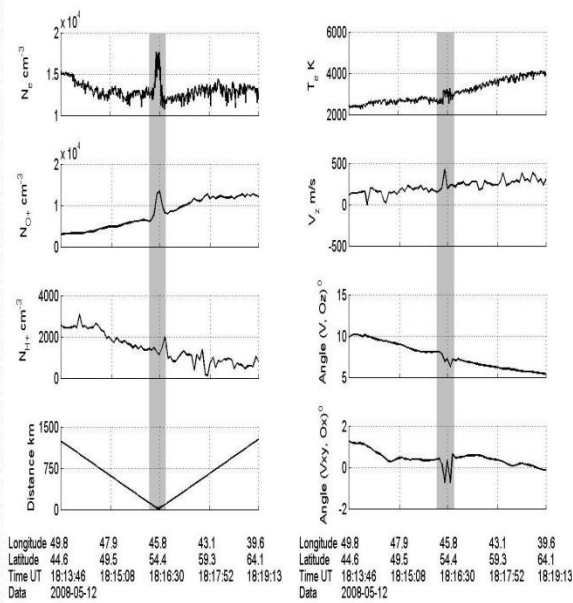
Дакты с избыточной плотность плазмы:

$\Delta N / \langle N \rangle$ ночью	$\Delta N / \langle N \rangle$ утром	$\Delta N / \langle N \rangle$ вечером	L_{\perp}
20 – 40%	до 2 – 4%	до 0.6 %	80 – 100 км

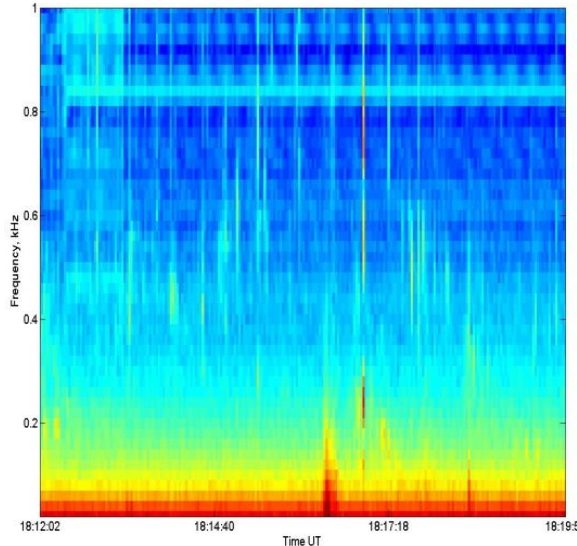
Вариации плотности и температуры плазмы:

	$\Delta T_e / \langle T_e \rangle$	$\Delta N_e / \langle N_e \rangle$	$\Delta T_i / \langle T_i \rangle$	$\Delta N_i / \langle N_i \rangle$	$\Delta l(N_e, T_e)$
30.04.05	5–10%	7–10%	< 2–3%	10–15%	~ 35 км
5.09.05	5–7%	6–10%	< 1–2%	10–15%	~ 25 км

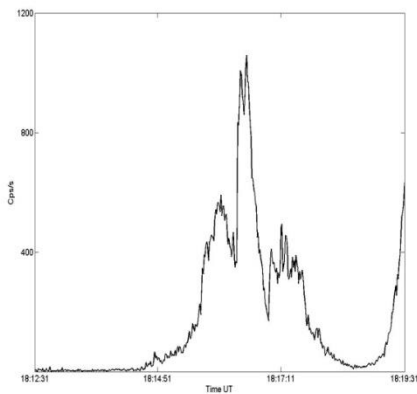
Некоторые результаты экспериментов СУРА- DEMETER



Представленные здесь 4 фигуры демонстрируют появление интенсивных электромагнитных полей внутри дукта и усиление потока энергичных электронов с $\mathcal{E} \approx 100$ кэВ.

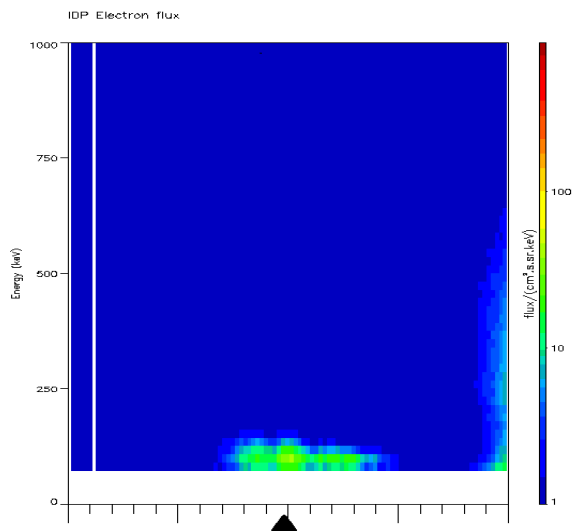
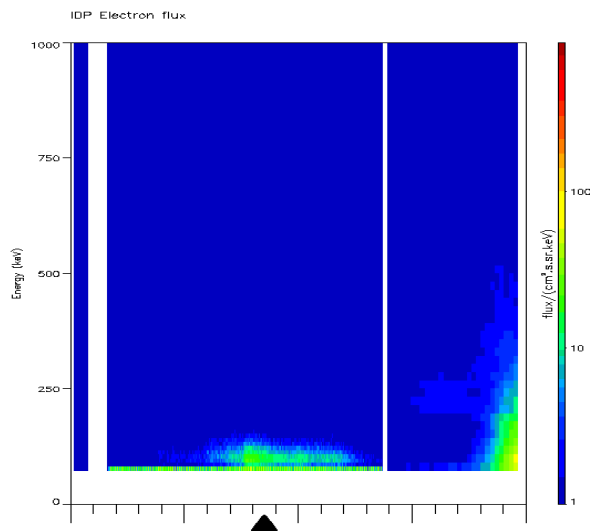


Более слабые потоки высыпающихся электронов регистрируются в более протяжённой области пространства.



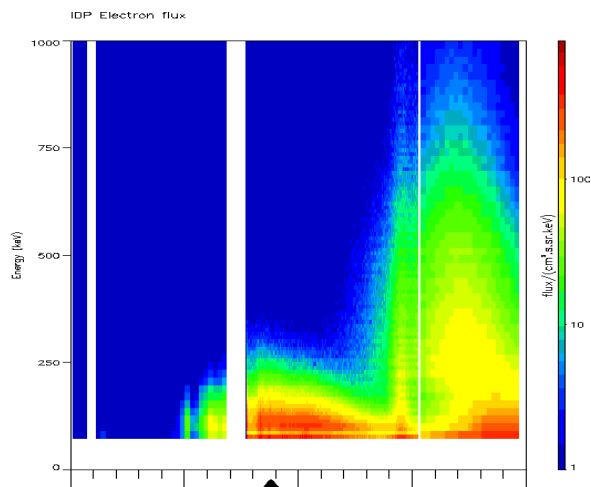
Стимулированные высыпания высоко-энергичных электронов

DEMETER Date (UT/AT): 2010/05/27 Orbit: 31587_1 DEMETER Date (UT/AT): 2008/05/12 Orbit: 20641_1

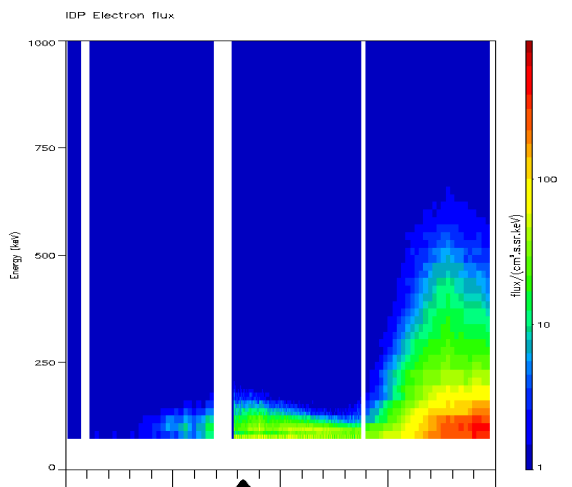


Высыпания при наличии дактов плотности плазмы; измерения в условиях низкого уровня авроральной активности ($[K_p \approx 0 - 1]$).

DEMETER Date (UT/AT): 2005/05/25 Orbit: 04761_1



DEMETER Date (UT/AT): 2006/05/20 Orbit: 10022_1



Высыпания, когда дакты не регистрировались; измерения в условиях повышенного уровня авроральной активности ($[K_p \approx 1 - 2]$).

UT/AT: 18:17:00/21:42 Lst: 44.77 Lon: 51.32
 18:18:37/21:35 Lst: 50.58 Lon: 49.03
 18:20:15/21:25 Lst: 56.31 Lon: 46.21
 18:21:52/21:12 Lst: 62.00 Lon: 42.58
 18:23:30/20: Lst: 67.68 Lon: 37.42

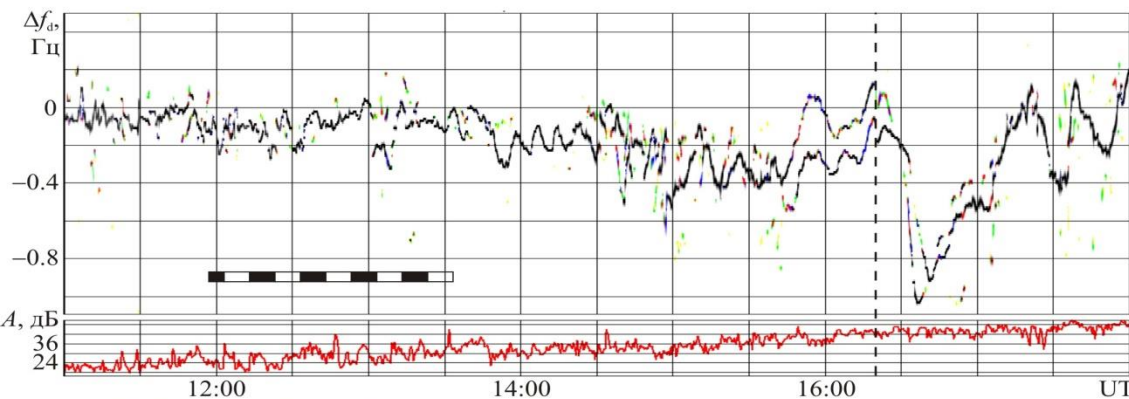
UT/AT: 18:26:00/21:43 Lst: 45.49 Lon: 50.81
 18:27:36/21:38 Lst: 51.29 Lon: 46.51
 18:29:13/21:28 Lst: 57.04 Lon: 42.88
 18:34:50/21:13 Lst: 62.74 Lon: 41.92
 18:36:27/20:53 Lst: 68.32 Lon: 38.61

Особенности генерации ПИВ

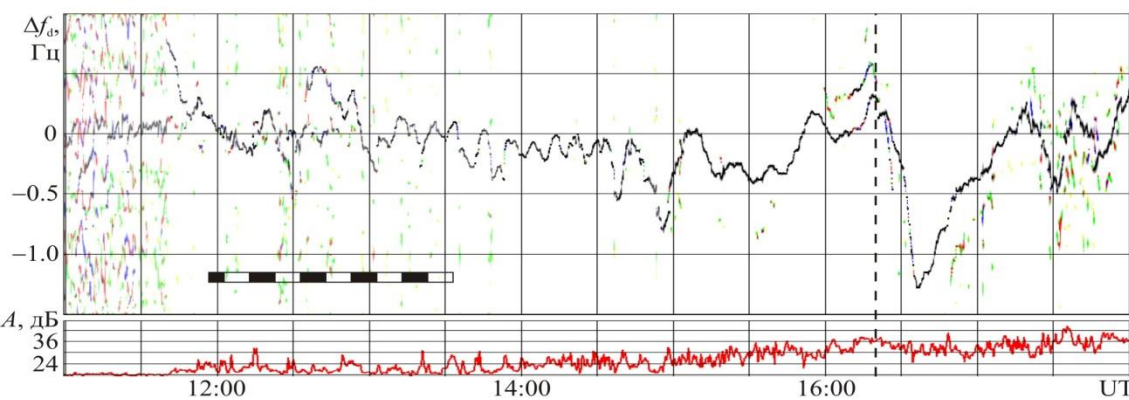
- СУРА излучала ВН с АМ в режиме меандр с периодом от 1 до 60 мин.
- Регистрация волновых возмущений (ВВ) проводилась около г. Харькова с помощью радара НР и доплеровского радара вертикального зондирования.
- Наиболее интенсивные ВВ возмущения с $\delta_N \approx 1 - 4\%$ (с максимальными значениями до 10%) регистрировались, когда для модификации ионосферы использовались волны *O*-поляризации, излучаемые в режиме меандр с $T \approx 30 - 60$ мин. Дневные значения δ_N были в несколько раз выше, чем ночные.
- Скорость распространения ВВ составляла 300 – 550 м/с.
- Эффект генерации — пороговый: нужны мощности ≥ 50 МВт.
- Эффективность генерации ВВ увеличивается при приближении частоты ВН к f_{0F2} .
- Индуцированные ВВ способны усиливать или ослаблять ВГВ, генерируемые солнечным терминатором (в зависимости от их взаимной фазировки).
- Обнаруживаются уединенные ВВ, генерирующиеся при включении и выключении нагрева ионосферы мощной КВ радиоволной.

По своим характеристикам ВВ часто отвечают ВГВ, распространяющимся на ионосферных высотах, но есть ВВ, которые распространяются со скоростями, много превышающими скорости ВГВ.

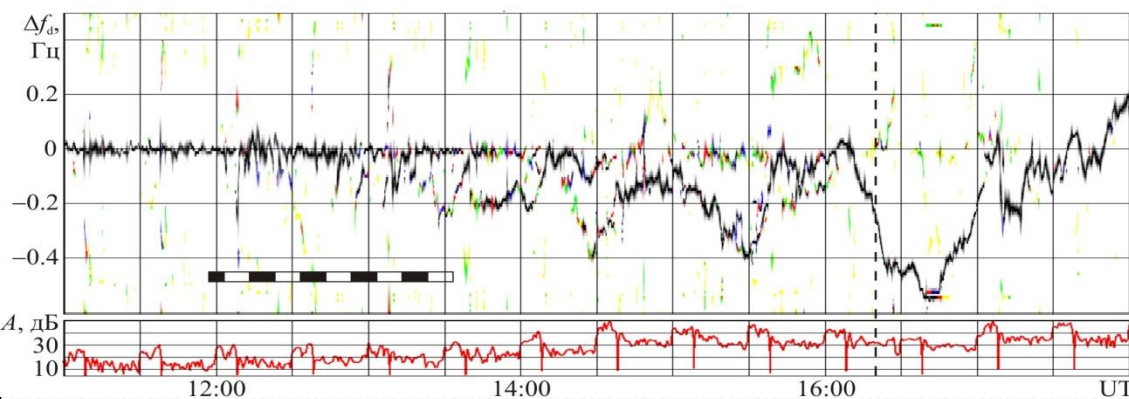
Особенности генерации ПИВ



3.2 МГц (В3)



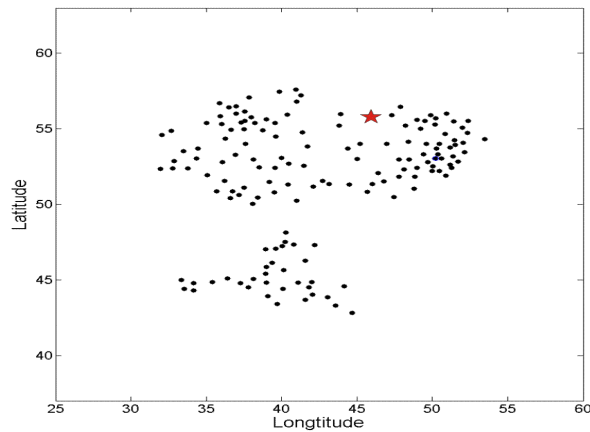
4.2 МГц (В3)



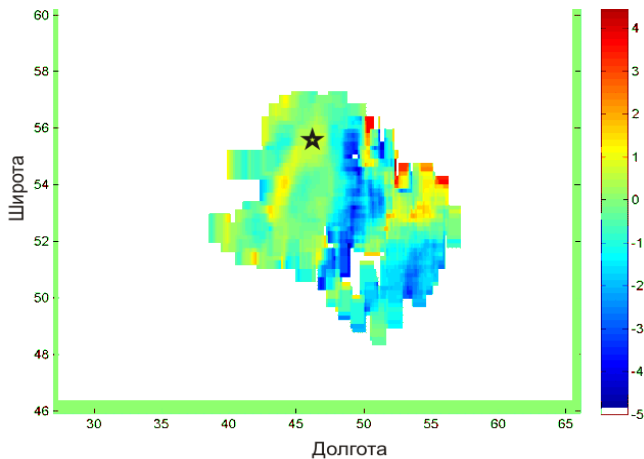
4.996 МГц (Н3)

Временные вариации доплеровского смещения частоты отраженного от ионосферы сигнала.

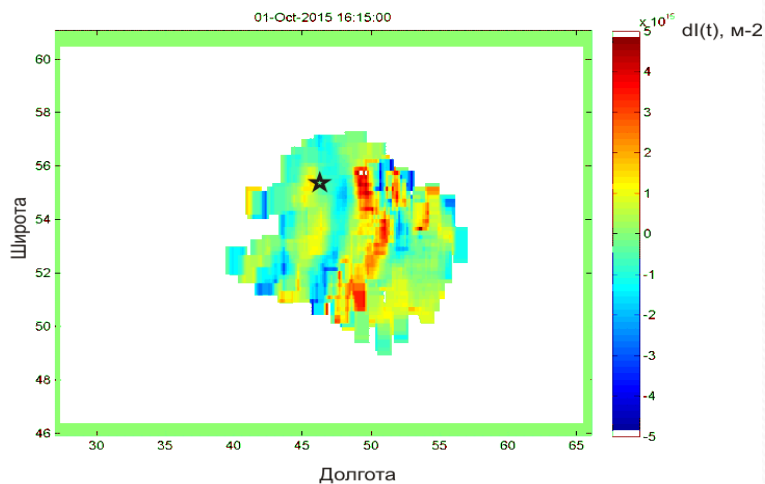
Особенности генерации ПИВ



$dl(t)$, м-2



Двумерная карта вариаций ПЭС, полученная за 1 мин до начала сеанса включения ВН (1 октября 2015 г., сеанс 16:01-16:16 UT).



Двумерная карта вариаций ПЭС, полученная после 14 мин нагрева ионосферы (сеанс 16:01-16:16 UT).

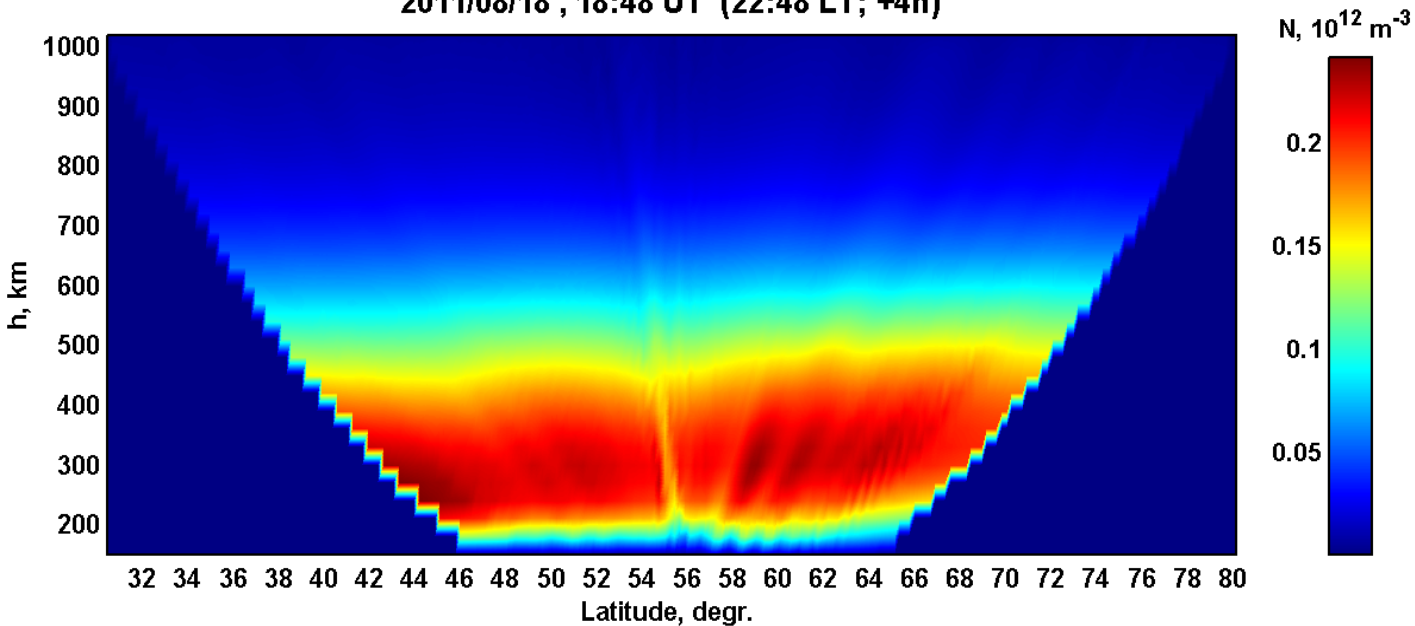
Двумерные карты вариаций ПИВ

ВЫВОДЫ:

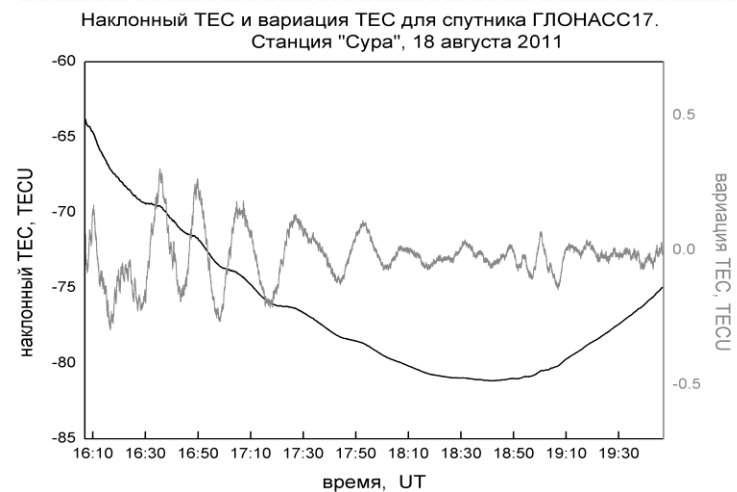
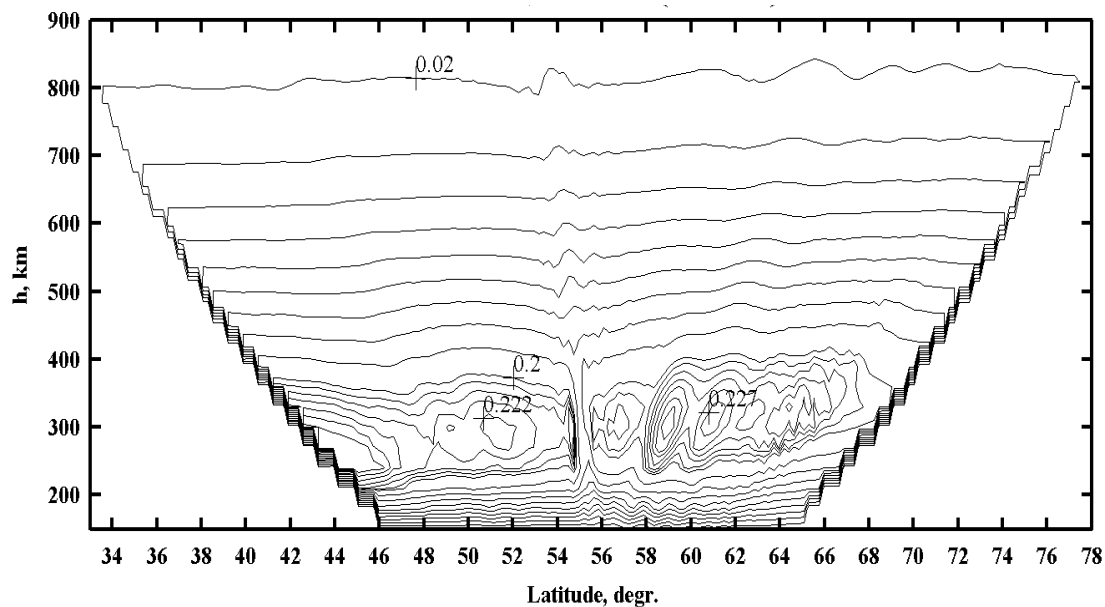
1. Увеличение вариаций ПЭС обнаруживается во всей исследуемой области $50 - 57^\circ$ сш и $45 - 55^\circ$ вд ($L \approx 800$ км).
2. Модификация ионосферной плазмы приводит к росту величины положительного ПЭС, зарегистрированных в естественных ПИВ (на $0.3 - 0.5$ TECU или $\Delta N/N \approx 3 - 5\%$), часто такое увеличение наблюдается в локальных областях и особенно сильно — на южном крае области их регистрации.
3. Развитие возмущений ПЭС составляет ~ 4 мин; время их и релаксации равно ~ 10 мин.
4. В некоторых случаях скорость перемещения возмущений значительно превышает скорость ВГВ.

Радиотомографические измерения

2011/08/18 , 18:48 UT (22:48 LT; +4h)



$\Delta N/N \approx 10\%$



ГЛАВНЫЕ ВЫВОДЫ:

Модификация F_2 -области ионосферы мощными КВ радиоволнами O-поляризации приводит к генерации интенсивной искусственной ионосферной турбулентности не только в области резонансного взаимодействия ВН с плазмой вблизи высоты её отражения, но и во всем теле ионосферы от её E-области до высот внешней ионосферы; в горизонтальном направлении индуцированные ВН возмущения плотности плазмы наблюдаются в области ~ 500 км, что намного превосходит размеры области ионосферы, засвеченной пучком мощных радиоволн (~ 100 км).

Сегодня можно считать доказанным, что нейтральная компонента атмосферы на ионосферных высотах также оказывается возмущенной при модификации ионосферы мощными КВ радиоволнами.

Через генерацию ВГВ и высыпания высокоэнергичных электронов возмущения атмосферных параметров при модификации ионосферы могут проявляться на значительных расстояниях от нагревного стенда (до тысячи и более километров).

За рамками доклада осталось:

- Генерация сигналов КНЧ-СНЧ-НЧ диапазонов.
- Генерация ИПН и их использование для изучения различных характеристик *D*-, *E*- и *F*- областей ионосферы.
- Результаты детальных исследований характеристик ИИН различных масштабов; их влияние на распространение радиоволн ВЧ-СВЧ диапазонов.
- Использование излучения стенда СУРА для локации ближнего космоса и Луны, а также для калибровки каналов КВ радиосвязи КА.
- Ускорение электронов в областях с сильно развитой ИИТ и результаты наблюдений искусственных оптических свечений.

**С затронутыми в докладе проблемами модификации
ионосферной плазмы мощными КВ радиоволнами более
детально можно познакомиться в вышедшем недавно
обзоре:**

**A. V. Streltsov, J.-J. Berthelier, A. A. Chernyshov, V. L. Frolov, F.
Honary, M. J. Kosch, R. P. McCoy, E. V. Mishin, M. T. Rietveld.
Past, Present and Future of Active Radio Frequency Experiments in
Space. // Space Science Reviw. (2018) 214:118,
<https://doi.org/10.1007/s11214-018-0549-7>.**



***СПАСИБО
ЗА
ВНИМАНИЕ !***

