

**СПУТНИКОВЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ
ПЛАЗМЕННЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ
И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТОКОВ,
ИНДУЦИРУЕМЫХ В СРЕДНЕШИРОТНОЙ
ИОНОСФЕРЕ ПРИ ЕЕ МОДИФИКАЦИИ
МОЩНЫМИ КВ РАДИОВОЛНАМИ**

**В. Л. Фролов (1,2), Р. Ю. Лукьянова (3),
А. О. Рябов (1), И. А. Болотин (1)**

- (1) НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород*
- (2) Казанский (Приволжский) федеральный университет*
- (3) ИКИ РАН*

- **Обобщение экспериментальных данных, полученных в 2016–2019 гг. при модификации F2-области среднеширотной ионосферы мощными *КВ радиоволнами* нагревного стенда СУРА.**
- **Измерения *плазменных возмущений и электрических токов*, которые индуцируются на ионосферных высотах проводились с помощью бортовой аппаратуры *спутников группировки SWARM*.**

Что известно о свойствах ИИТ в центральной части ВО

Вблизи высоты отражения ВН наблюдаются:

- Развитие неустойчивостей: стрикционной, тепловой и самофокусировочной;
- Генерация неоднородностей концентрации плазмы с размерами поперек линий геомагнитного поля от долей метра до десятков километров;
- Ускорение электронов до сверхтепловых энергий;
- Сильный разогрев плазмы и уменьшение ее плотности. Вытесненная вверх плазма обуславливает образование вытянутых вдоль геомагнитного поля дактов с увеличенной плотностью на высотах ≥ 600 км.

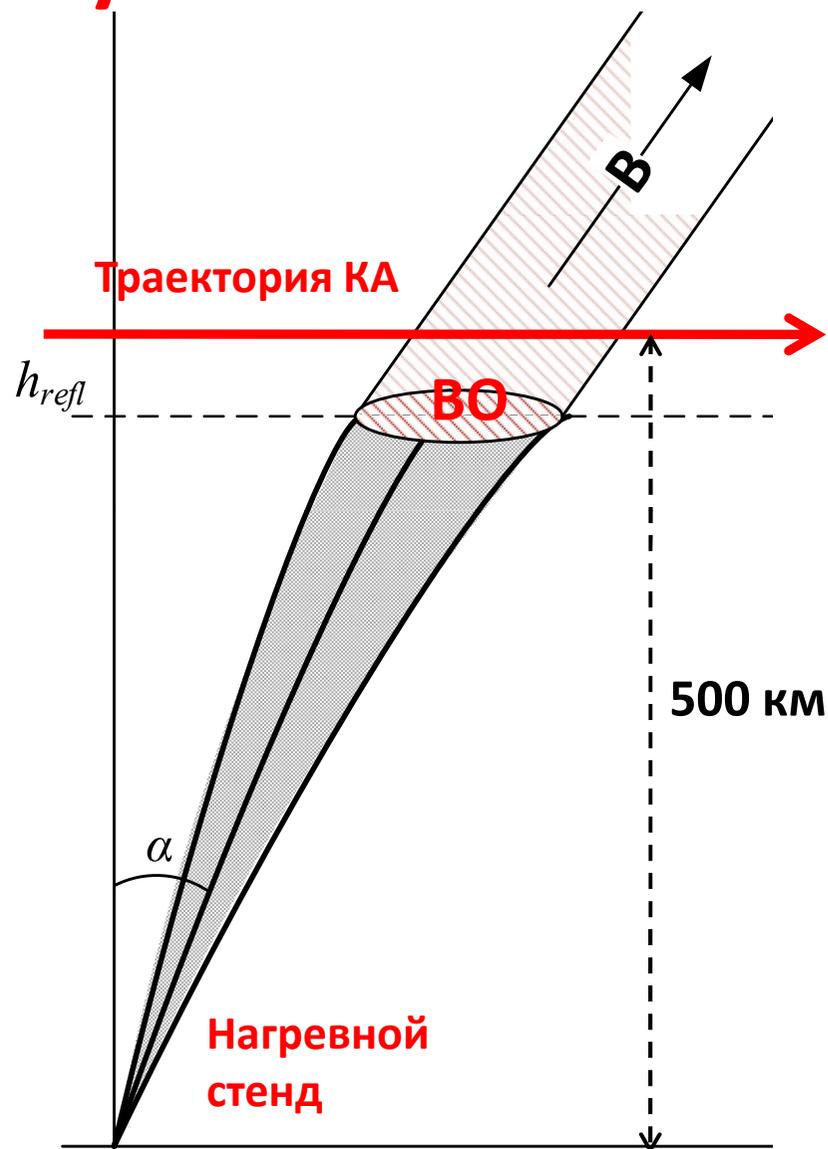
За пределами центральной части ВО ионосферы:

- **Обнаружены «дальние» искусственные плазменные возмущения, границы которых выходят далеко за пределы центральной части ВО, где генерируются первичные ИИТ.**
- **Существуют прямые и обратные связи между генерацией первичных и свойствами дальних ИИТ.**

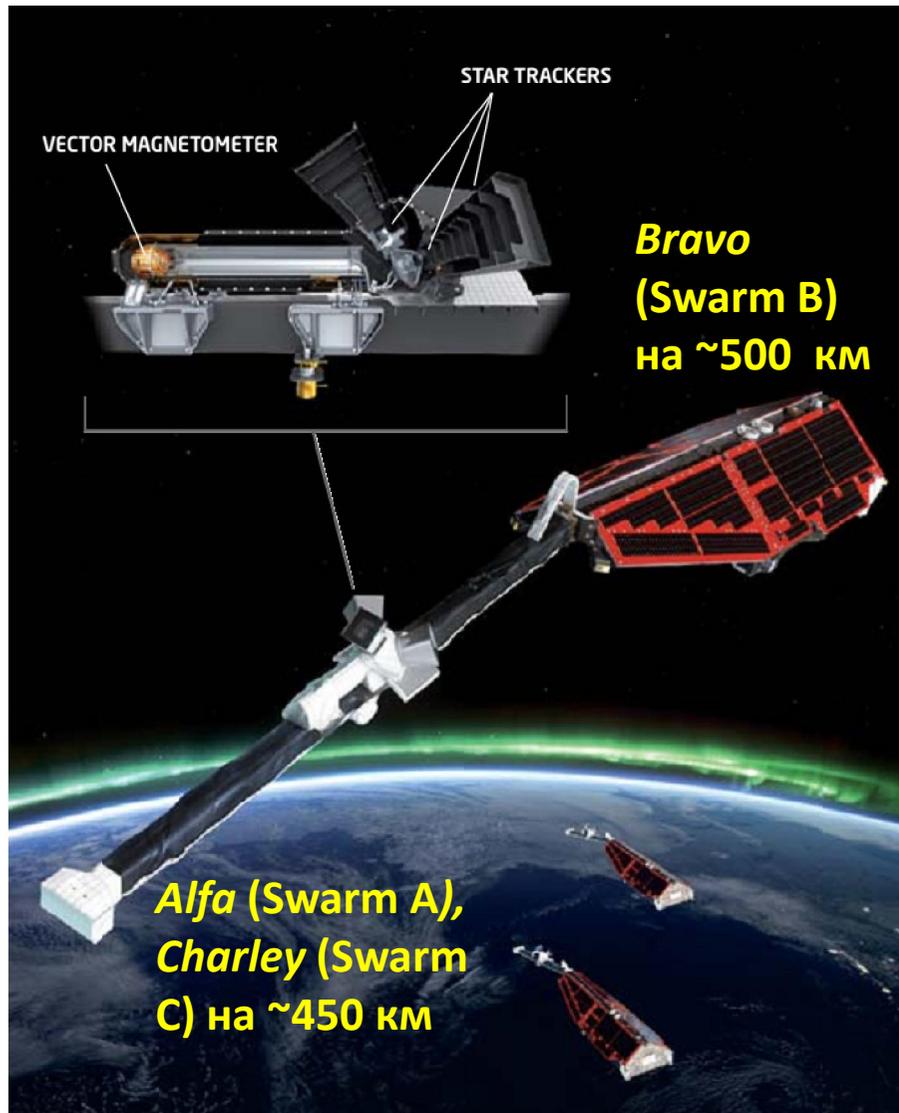
Чем обусловлены такие связи? Термодиффузионными процессами? Возбуждаются ли вихревые электрические токи в фоновой плазме? Соответствуют ли данные измерений в космосе результатам лабораторных экспериментов?

Геометрия координированных сеансов «нагрев - спутник»

Центральная часть ВО при модификации F_2 -области мощными КВ радиоволнами О-поляризации в горизонтальной плоскости определяется шириной пучка излучаемых нагревным стендом радиоволн: 50 – 100 км на высотах 200 – 300 км; в вертикальном направлении ВО имеет размеры до 30 км.



Миссия Swarm (ESA)



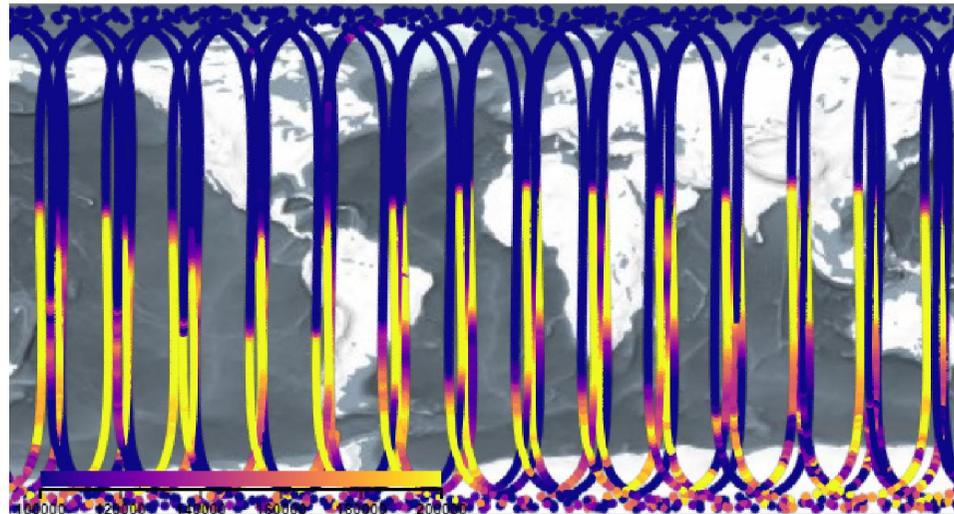
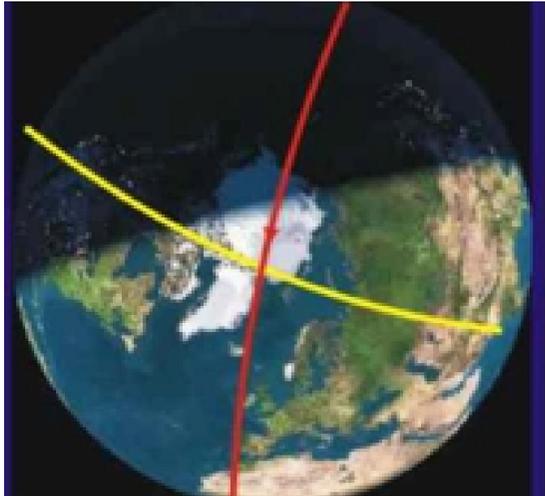
Три одинаковых спутника на низкой полярной орбите

Основные сенсоры:

- **Векторный магнитометр** – магнитные вариации, создаваемые продольным током
- **Ленгмюровский зонд** - параметры плазмы T_e , N_e

Орбиты *Swarm*

- ✓ 12-13 полярных орбит в день, смещающихся по долготе.
- ✓ *Alfa* и *Charley* летят в паре параллельно друг другу на расстоянии ~50 км.
- ✓ Орбита *Beta* отклонена от пары *Alfa/Charley*.



Трудности постановки сопряженного эксперимента

- ✓ Редкость прохождения орбиты над станцией;
- ✓ Точность предварительного расчета эфемерид;
- ✓ Обработка данных: выделение слабого сигнала.
- ✓ Подбор параметров ионосферы.

В 2016-2019 :

более 70 сопряженных экспериментов по программе СУРА–SWARM при различных геофизических условиях

- Стенд излучал мощные радиоволны О-поляризации, использовался наклон диаграммы направленности излучения ВН на 12° на юг.
- Стенд включался за ~ 15 мин до времени пролета КА через ВО, что достаточно для полного развития ИИТ.
- Эффективная мощность излучения ($P_{эфф}$) в режиме синхронного излучения всех трёх его модулей лежала в диапазоне 20-120 МВт на частоте излучения $f_{ВН} \approx 4.3-5.9$ МГц.

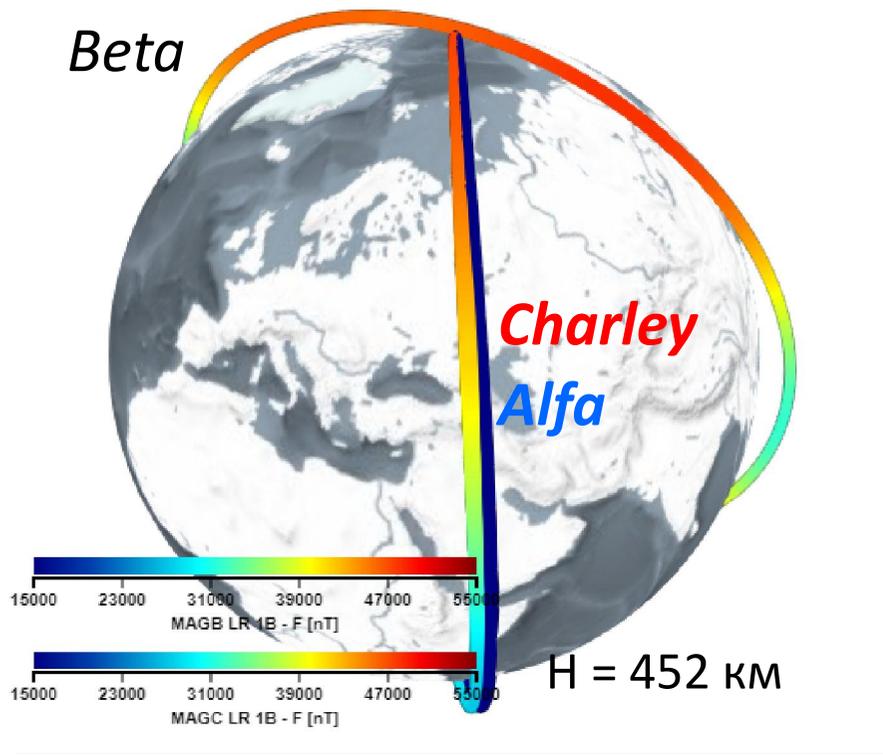
Определены наилучшие параметры сеансов:

- Вечерние часы; $f_{ВН} < f_{OF2} < 6$ МГц; $P_{эфф} > 40$ МВт.
- Траектория пролета спутника должна проходить ближе 100 км от центра возмущённой магнитной силовой трубки.

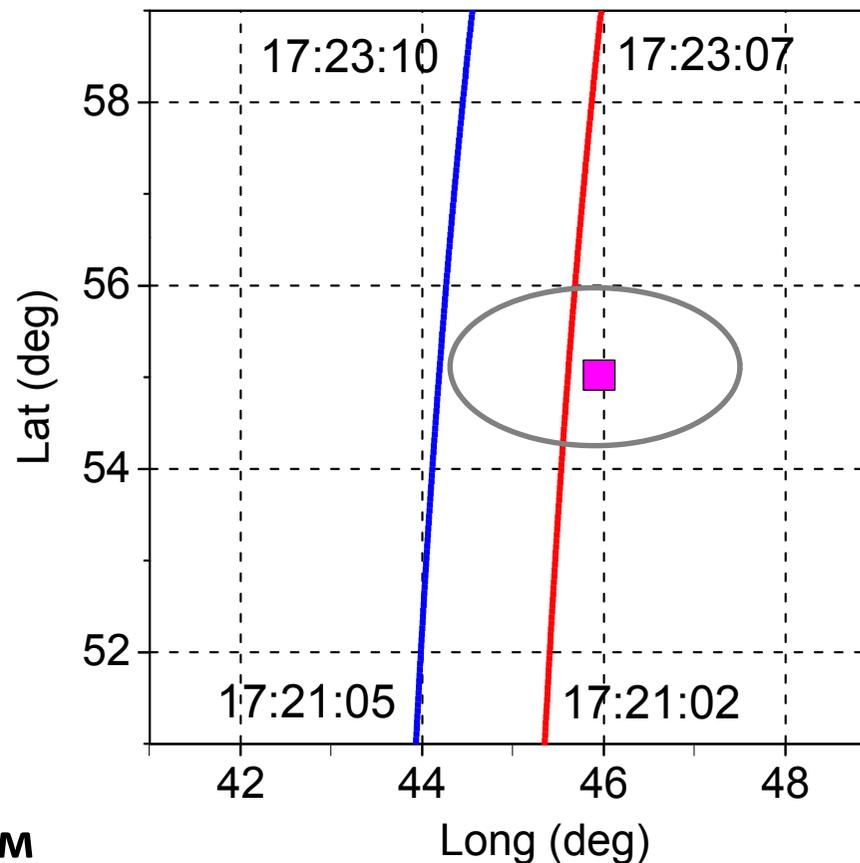
За 4-летний период исследований было всего **около десятка случаев**, когда выполнялись все необходимые условия для возбуждения и регистрации сильных плазменных возмущений во внешней ионосфере Земли при ее модификации мощными КВ радиоволнами, в которых параллельно с этим также наблюдалась генерация продольных токов в ВО.

Эксперимент 27.08.2016

Alfa & Charley



Расстояние от траектории до центра возмущенной трубки: **20 км (Charly)** и **95 км (Alfa)**



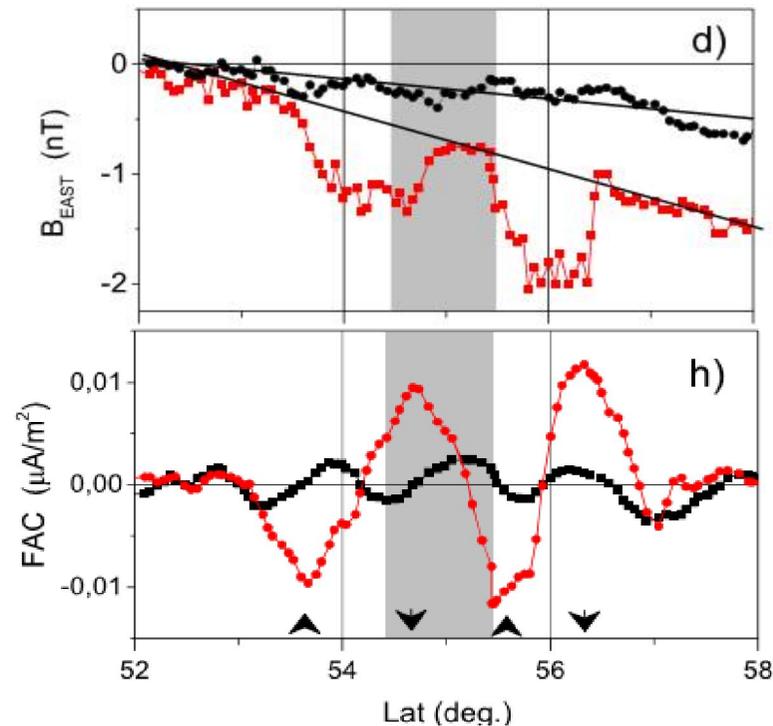
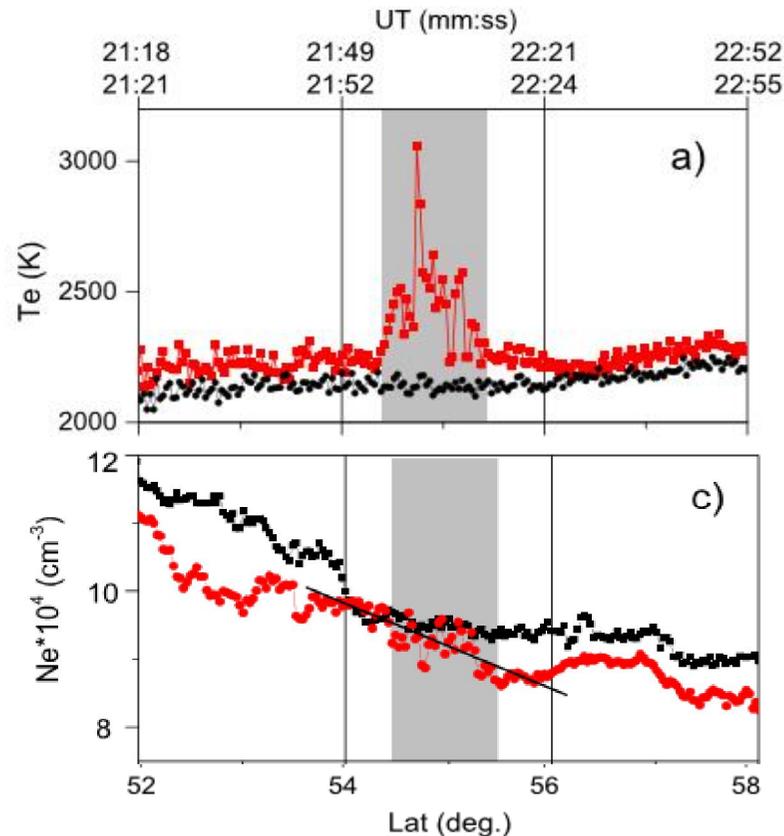
Параметры нагрева:

- $f_{PW} / f_0 F2 = 4.3 / 5.0 \text{ МГц}$
- $P_{\text{eff}} = 55 \text{ МВт}$
- Высота отражения ВЧ волны 230 км

Возмущения плазмы (T_e , N_e) и магнитного поля ($j \sim \frac{dB}{dl}$)

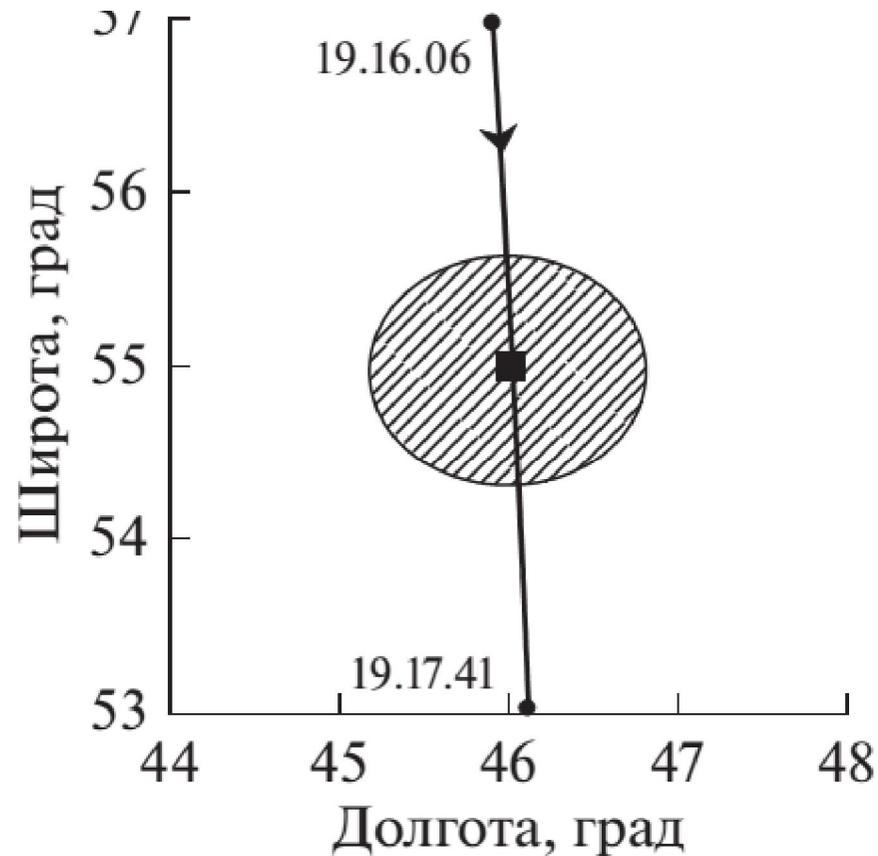
Charley
(20 км от центра ВО)

Alfa
(95 км от центра ВО)



- Локальное увеличение T_e до $\sim 30\%$. Стратификация N_e (вариации на $\sim 2\%$).
- Вариации магнитного поля амплитудой ~ 1 нТл.
- Система токов: втекающий в ионосферу (направлен вниз \downarrow) в середине ВО, на периферии – вытекающий из ионосферы (направлен вверх \uparrow), плотность $\sim 0.02 \mu\text{A}/\text{m}^2$.

Эксперимент 25.04.2016: *Beta*



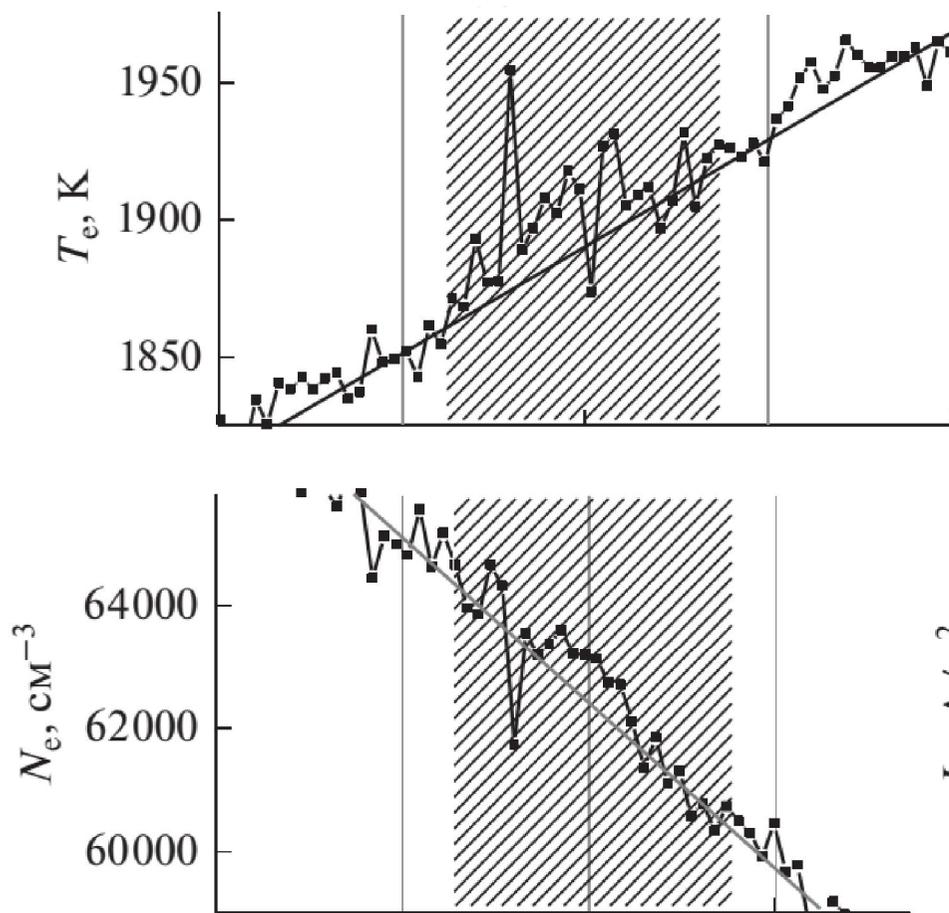
Неосвещенная ионосфера

Спокойные геомагнитные условия

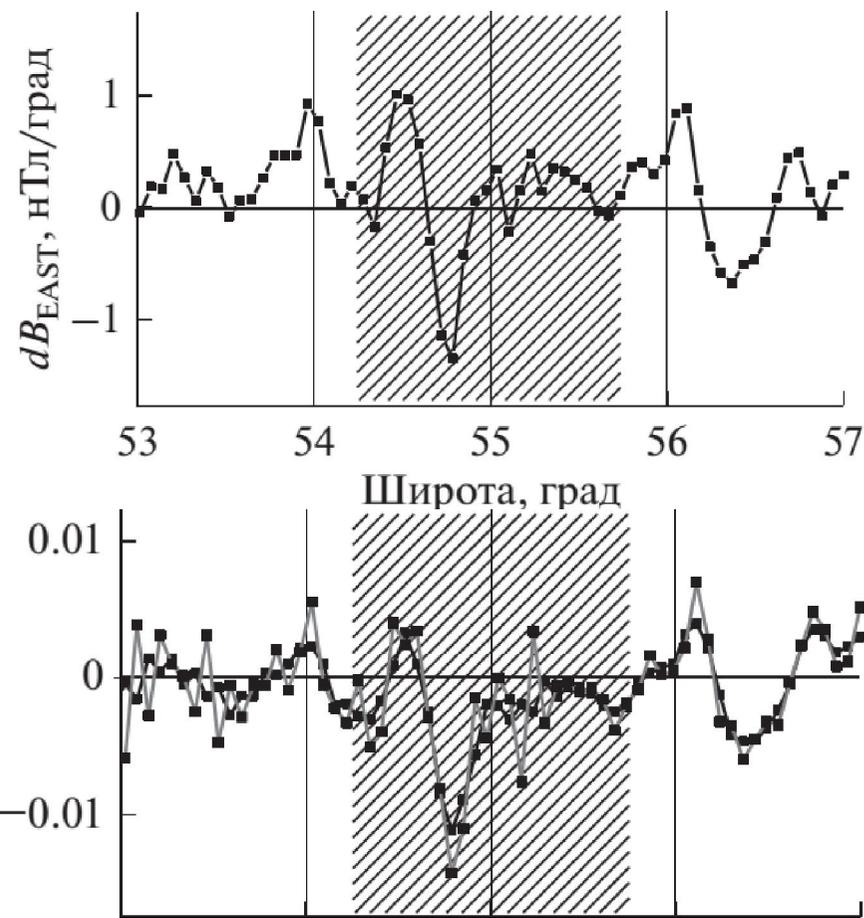
ВН излучалась на частоте 4300 кГц при $f_{0F2} = 4.6$ МГц;

Высота отражения ~ 240 км.

Низкая эффективная мощность ВН, $P_{эфф} \approx 20$ МВт.



Локальное уменьшение концентрации плазмы и увеличение ее температуры



В южной части ВО - втекающий в ионосферу ток ($0.005 \mu\text{A}/\text{m}^2$), что соответствует выносу электронов вверх и совпадает с уменьшением N_e . По краям ВО - вытекающие токи ($\sim 0.01 \mu\text{A}/\text{m}^2$).

Выводы по сериям сопряженных экспериментов по модификации среднеширотной F-области ионосферы мощной КВ волной O-поляризации и низкоорбитальными спутниками SWARM.

- Нагрев приводит к локальному повышению температуры электронов (до 30%), сопровождающемуся стратификацией плотности плазмы (1-4%).
- Возбуждается специфическая система продольных токов, состоящая из вытекающего тока, окруженного вытекающими, плотность $0,01-0,05 \mu\text{A}/\text{m}^2$ на пространственных масштабах ~ 100 км.
- Эффект схож с расплыванием локально нагретой области магнитоактивной плазмы в лабораторных плазменных установках. Это отвечает униполярному характеру термодиффузионного распространения плазменных возмущений с генерацией вихревых токов, продольные компоненты которых определяются движением электронов вдоль магнитного поля, а поперечные – движением ионов поперек него. Скорость процессов термодиффузии с униполярными коэффициентами во много раз превышает скорость в амбиполярном приближении.