

# Эффекты распространения радиоволн и плазменные структуры в ионосфере по данным GNSS измерений на трассах спутник-спутник и спутник-Земля

Павельев А.А.

<sup>1</sup>Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН (Фрязинский филиал), Фрязино, Россия, [alxndr38@gmail.com](mailto:alxndr38@gmail.com)  
«Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» (БШФФ-2017)»  
Сентябрь 10-16 2017 ИСЗФ СО РАН Иркутск



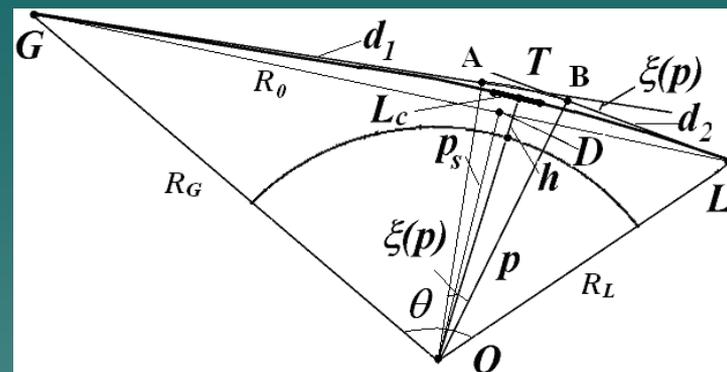
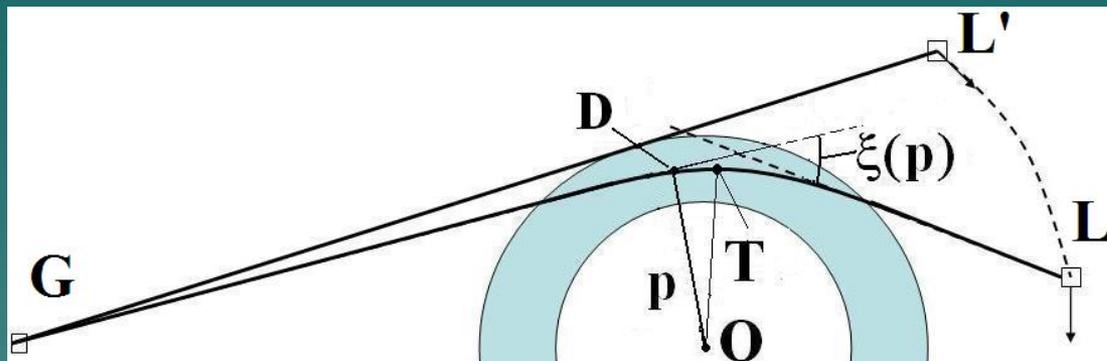
# Аннотация

1. Представлена классификация влияния слоистых и случайно-неоднородных структур в ионосфере по данным радиозатменных измерений фазы и амплитуды радиоволн на трассе спутник навигационной системы GPS-низкоорбитальный спутник.
2. Представлены результаты радиозатменных наблюдений воздействия мощного радиопередатчика HAARP на высотные профили электронной концентрации в ионосфере; осуществлено сравнение с прогнозом по модели IRI-2012.
3. Проведен предварительный анализ данных измерений высотных профилей электронной концентрации на трассе навигационные спутники – корабль во время экспедиции на трассе Кронштадт – Антарктида в течение ноября 2015 – апреля 2016 года.

# Существующие и планируемые спутниковые навигационные системы

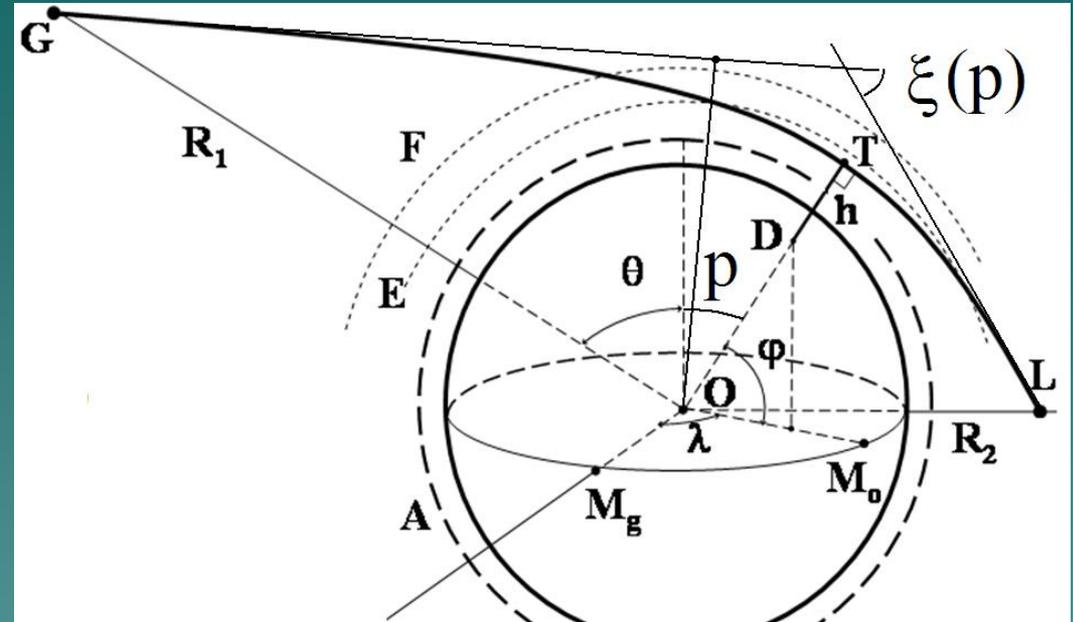
	<b>GPS</b>	<b>GLONASS</b>	<b>Galileo</b>	<b>Compass</b>	<b>QZSS</b>
Число спутников	24	24	30	35	3
Высота орбиты	20,200 km	19,100 km	23,222 km	27 in medium earth orbit, 5 in geostationary orbit, and 3 in geosynchronous orbit	39,000 km
Несущие частоты	L1: 1,575 MHz L2: 1,227 MHz L5: 1,176 MHz	G1: 1,602 MHz G2: 1,246 MHz G3: 1,204 MHz	E1: 1,575 MHz E5a: 1,176 MHz E5b: 1,207 MHz E6: 1,268 MHz	E1: 1,557 MHz E2: 1,561 MHz E6: 1,268 MHz E5b: 1,207 MHz	L1: 1,575 MHz L2: 1,227 MHz L5: 1,176 MHz

# Применение сигналов навигационных систем для радиоголографии ионосферы и атмосферы



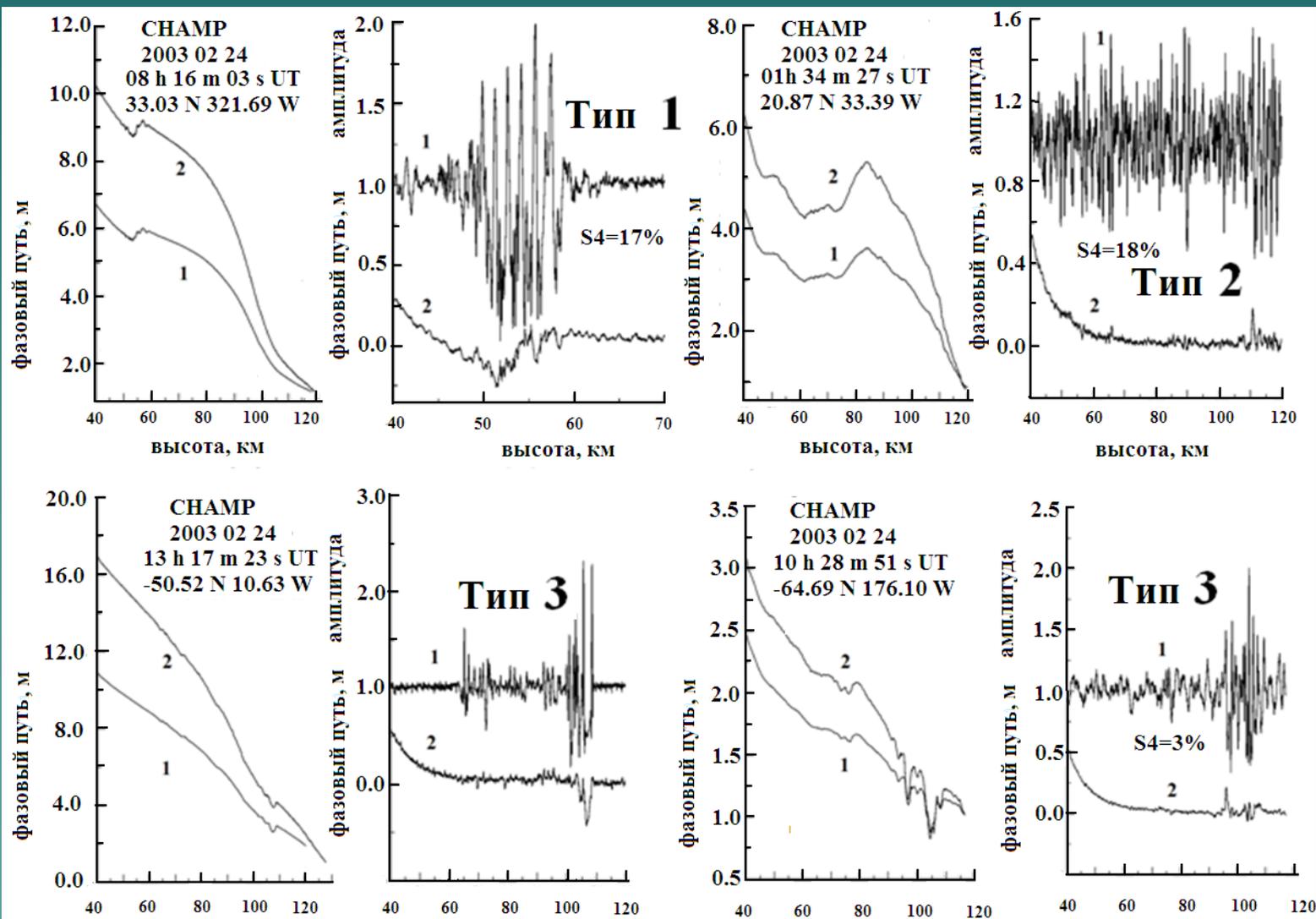
На участке орбиты  $LL'$  приемник низкоорбитального спутника регистрирует радиоголограммы на двух несущих частотах навигационного сигнала, излучаемого спутником  $G$ . Опорным сигналом является расчетная (прогнозная) зависимость от времени доплеровской частоты радиоволн, распространяющихся по прямой линии  $GL$  при отсутствии атмосферы. Радиоголограмма содержит временную зависимость доплеровского сдвига частоты и вариации амплитуды радиоволн относительно опорного сигнала из-за влияния атмосферы и ионосферы на трассе  $GTL$ . Из радиоголограммы с привлечением данных о параметрах орбиты восстанавливается зависимость угла рефракции  $\xi(p)$  от прицельного параметра  $p$ . При обработке в предположении сферической симметрии с центром в точке  $O$  (практически совпадает с центром Земли) определяется вертикальный профиль показателя преломления  $n(h)$  в зависимости от высоты  $h$  в атмосфере (ионосфере) перигея радиолуча – точки  $T$ .

# Трасса спутник навигационной системы GPS – низкоорбитальный спутник. Принцип локальности радиозатменных измерений



Приемник на спутнике L регистрирует при движении вдоль орбиты две радио-голограммы – временные зависимости изменения фазы и амплитуды навигационных сигналов на двух частотах. Радио-голограммы содержат информацию о характеристиках околоземного пространства вдоль трассы распространения радиоволн GTL. При допущении о сферической симметрии околоземной среды эти изменения вызваны, главным образом, влиянием областей ионосферы и атмосферы вблизи точки перигея T радио-луча относительно центра симметрии (точки O), практически совпадающем с центром Земли. По измеренным изменениям фаз и амплитуд и по известным эфемеридам спутников G и L можно рассчитать вертикальный профиль угла рефракции  $\xi(p)$  ( $p$  – прицельный параметр), а также высотные зависимости показателя преломления атмосферы  $n(h)$  и электронной концентрации ионосферы  $N_e(h)$  в точке перигея T с географическими координатами  $\varphi$  и  $\lambda$ .

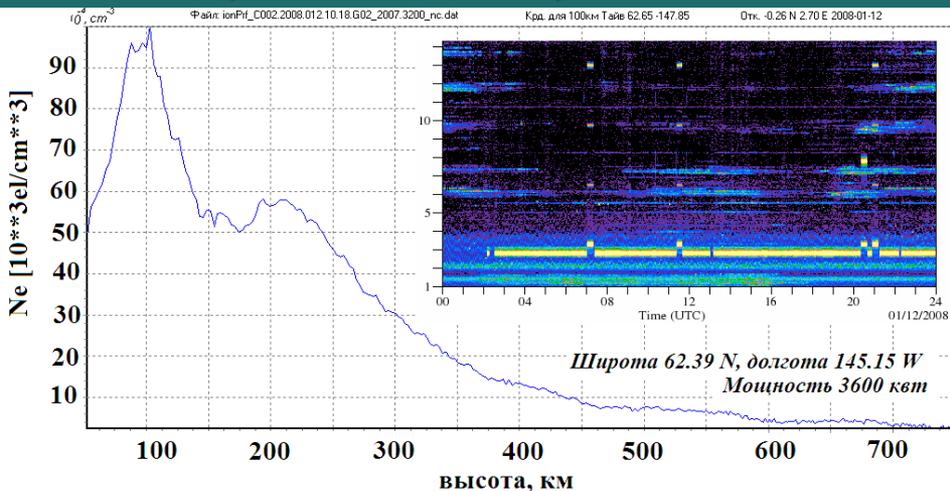
Влияние ионосферы на фазовый путь (м) и амплитуду сигнала в зависимости от высоты перигея радиолуча относительно поверхности Земли в радиозатменных экспериментах (данные спутника CHAMP). (1)– дифракция на регулярных неоднородностях; (2) рассеяние на случайных неоднородностях; (3) изолированные слои и случайные неоднородности.



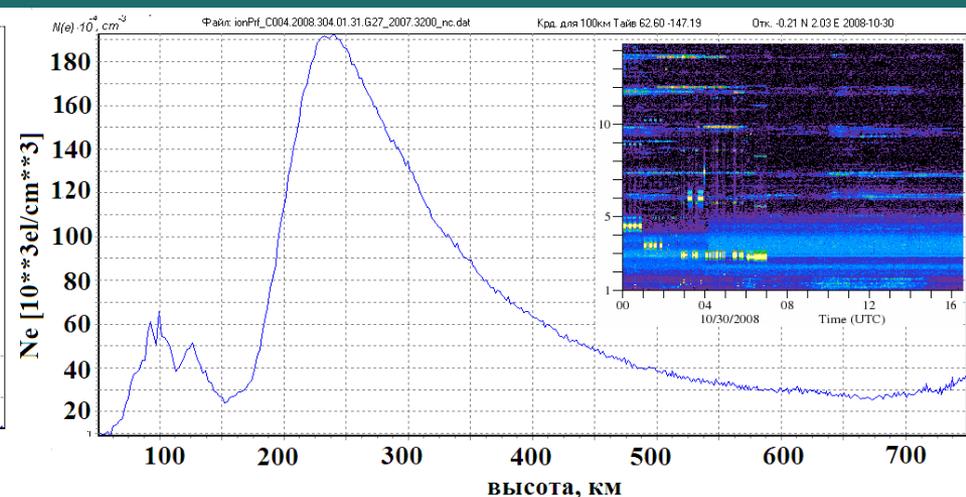
# HAARP: Влияние на ионосферу по радиозатменным данным

1. По результатам 117 сеансов измерений вертикального профиля электронной концентрации, осуществленных в 2010 и 2011 гг. с помощью радиозатменной системы FORMOSAT-3/COSMIC, проведен анализ структуры ионосферы вблизи нагревного стенда HAARP (Аляска, координаты  $62.65^{\circ}$  с.ш. и  $147.85^{\circ}$  з.д.).
2. Измеренные высотные профили электронной концентрации сравнивались с расчетами по модели IRI-2007.
3. При отсутствии излучения стенда HAARP расхождение результатов радиозатменных измерений и расчетов по модели в 70% событий не превышает 2-3 раз по значениям электронной концентрации на соответствующих высотах и 20-50 км по положению максимума слоя F2.
4. Приведены примеры сравнения высотных профилей измеренной и расчетной электронной концентрации.
5. Приведен пример одновременного зондирования двумя разными спутниками с примерно перпендикулярных направлений: первое-отклонение на 13 градусов относительно магнитной линии, второе примерно на 115 градусов, в результате выявлена существенная анизотропия неоднородностей в ионосфере над стендом HAARP.
6. Радиозатменные данные позволяют изучать воздействие нагревного стенда HAARP на ионосферу в широком интервале высот от 90 до 700 км

# Первые результаты сравнения радиозатменных измерений высотных профилей электронной концентрации ионосферы с работой мощного нагревного устройства НААРП (Аляска, США)



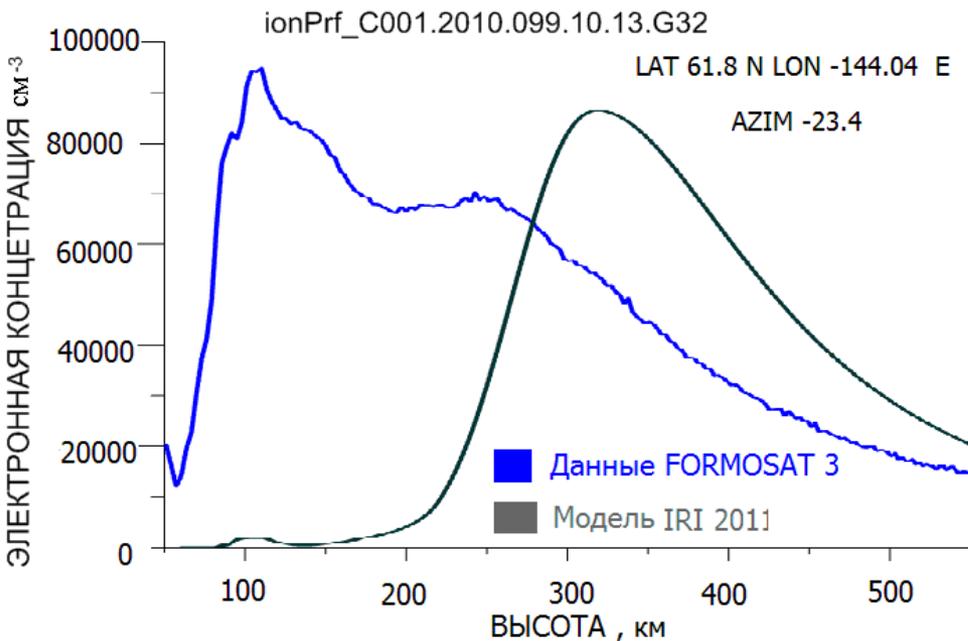
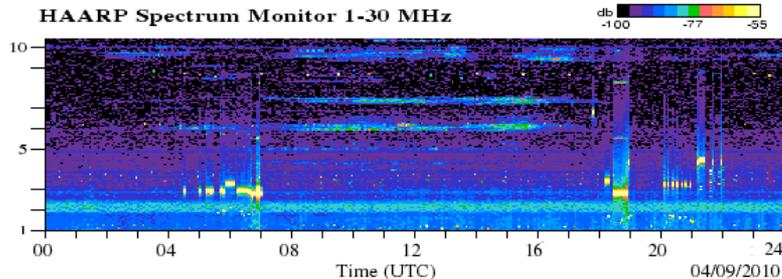
Сеанс 12 января 2008г. в 10:18 UTC. На вставке - циклограмма работы нагревного стенда НААРП. В 10:18 UTC стенд излучал в непрерывном режиме на частоте 2.8 МГц, максимум электронной концентрации на высотах 85-105 км, ~ 105 электронов/см<sup>3</sup>. Район радиопросвечивания смещен на 140 км к востоку и 26 км к югу от стенда НААРП.



Сеанс состоялся 30 октября 2008г. в 01:31 UTC. На вставке циклограмма работы нагревного стенда НААРП. Время измерений - 01:31 UTC, стенд излучал в непрерывном режиме на частоте 3.5 МГц. Частота соответствовала критической частоте ионосферного слоя F, в результате образовался максимум электронной концентрации на высотах 200-300 км, порядка (1.5-2.0)10<sup>5</sup> электронов/см<sup>3</sup>. Район радиопросвечивания смещен на 120 км к востоку и 21 км к югу от стенда НААРП.

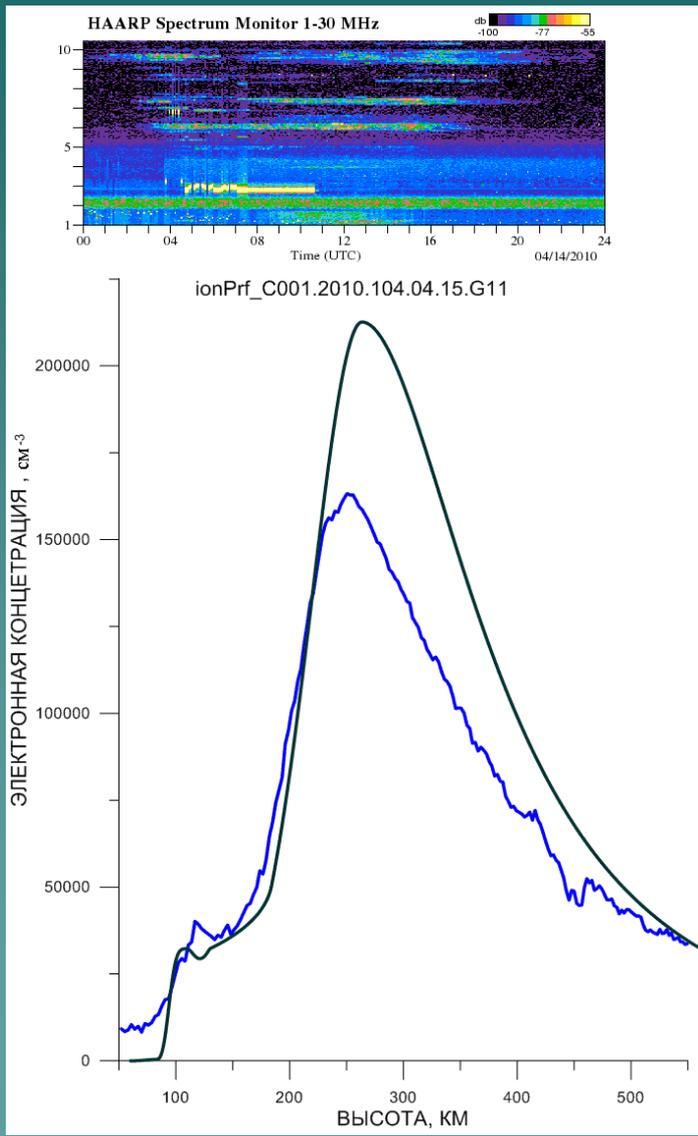


# Сопоставление данных радиозатменных измерений высотных профилей электронной концентрации в районе HAARP с моделью IRI 2011



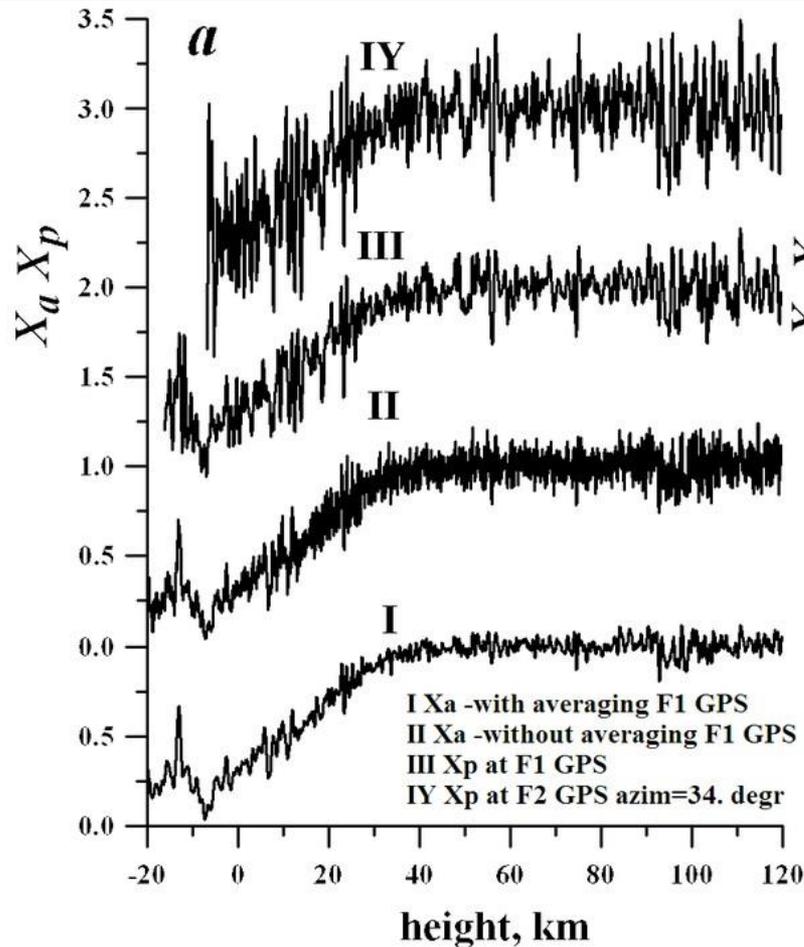
Синяя кривая- результат измерения высотного профиля электронной концентрации Ne(h) 9 апреля 2010 г. в 10 ч 08 мин всемирного времени UTC, (0 ч 28 мин местного времени (LT)), примерно через 3 часа после окончания работы на частотах 2,8 – 3.2 МГц. Черная кривая - расчета Ne(h) по модели. Сравнение измеренной и модельной зависимостей Ne(h) демонстрирует их разительное отличие. В радиозатменных измерениях максимум электронной концентрации, достигающий  $9,5 \times 10^4$  эл/см<sup>3</sup>, наблюдается в слое E на высоте около 110 км, слой F<sub>2</sub> слабо выражен и смещен относительно модельного вниз на 80 км. Ответ на вопрос является ли такое значительное изменение зависимости Ne(h) следствием воздействия только излучения станда или действуют и другие механизмы требует большего объема данных, чем имеется на данное время.

## Сопоставление данных радиозатменных измерений высотных профилей электронной концентрации в районе HAARP с моделью IRI 2011



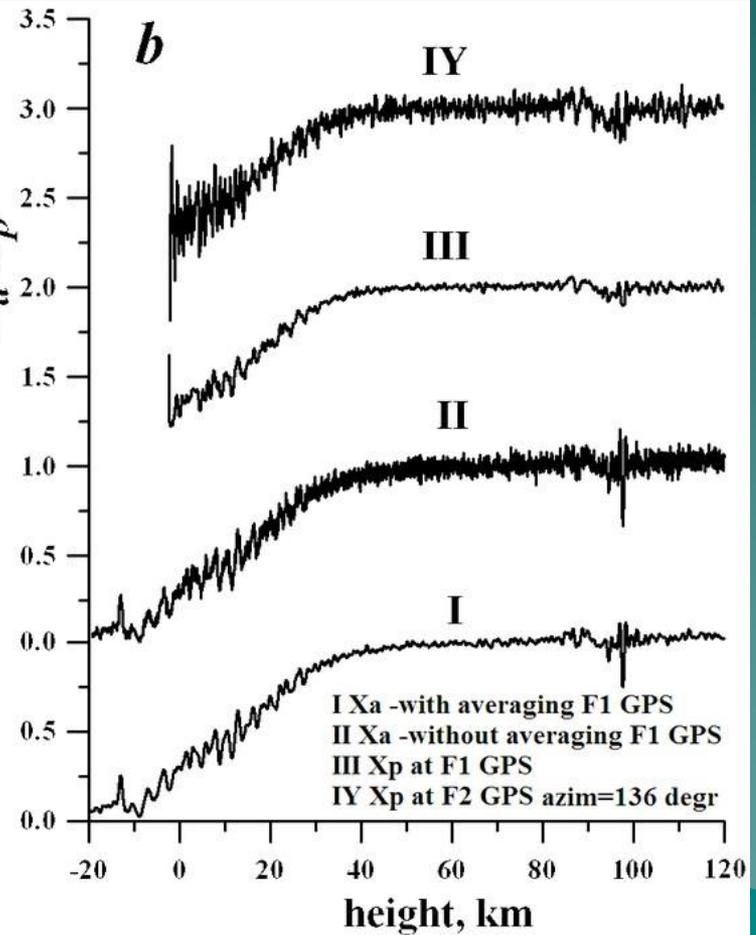
Сравнение измеренного во время работы станда и модельного профилей Ne(h). Затменные измерения Ne(h) проводились 14 апреля 2010 г. в 4 ч 09 мин UTC в районе с координатами 62,15° с.ш. и 143,18° з.д. Длительность сеанса измерений составляла около 5 мин. В это время станд излучал на коротких временных интервалах сигнал на частоте около 6,8 МГц. Синяя кривая на рис. 2 описывает измеренный высотный профиль Ne(h), а черная – расчет по модели. Сравнение измеренной и модельной зависимостей Ne(h) демонстрирует практически полное совпадение их на высотах ниже 250 км и расхождение не более чем на 30% выше (слабое влияние станда на структуру ионосферы при локальном кратковременном излучении). Во время работы станда на частоте 6,8 МГц различие между координатами станда и района радиозатменных измерений составляло 0,5° по широте и 4,67° по долготе, т.е. около 250 км по расстоянию.

# Сравнение двух практически одновременных радиозатменных зондирований ионосферы над станцией HAARP с перпендикулярных направлений. Сеанс 14 июля 2011 года.



FORM3 01950145 34.121 .009 .001 .001  
 2011 07 14  
 23 h 48 m 50 s UT  
 14 h 00 m 51 s LT  
 64.8 N 147.0 W  
 59.3 N 156.2 W LI  
 71.0 N 135.9 W GI  
 456 505 1006 1619 741 1074 740

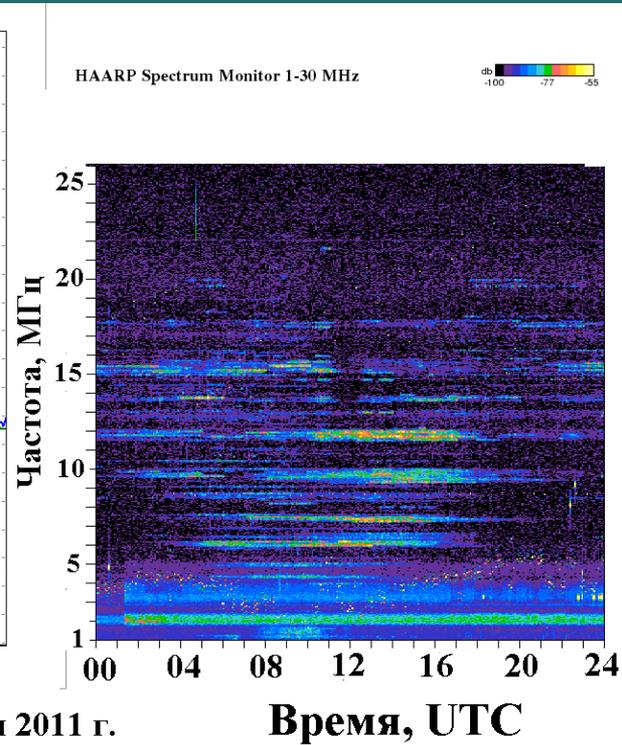
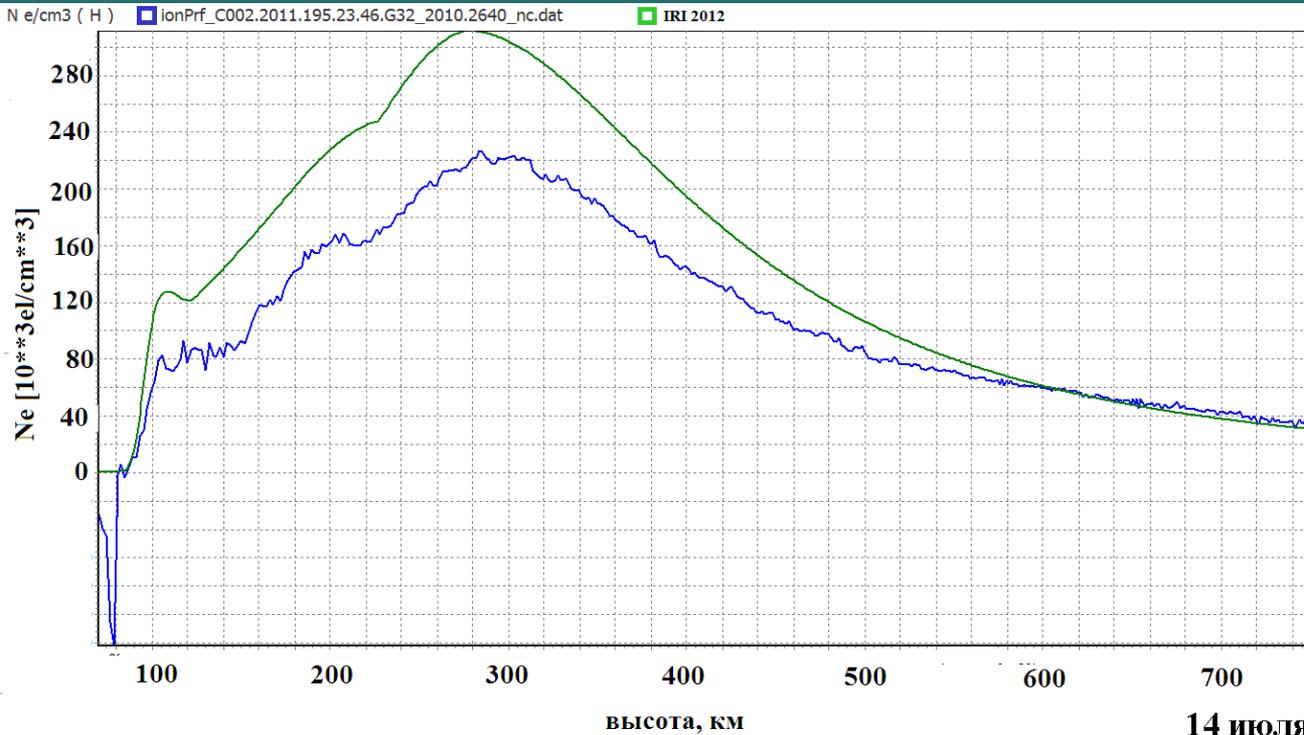
S4=4.56% magn. incl. 21 degr.



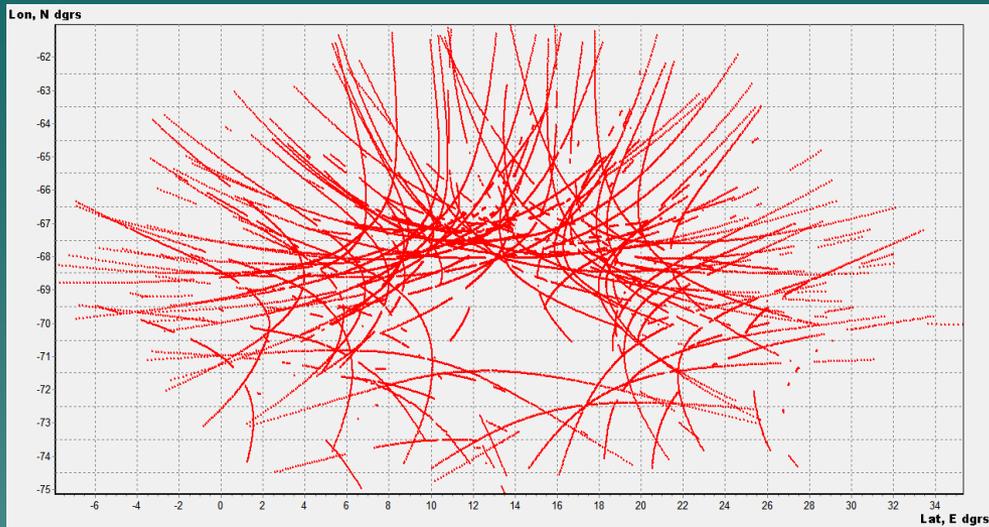
FORM3 01950042 136.312 .009 .001 .000  
 2011 07 14  
 23 h 36 m 10 s UT  
 13 h 54 m 51 s LT  
 62.5 N 145.3 W  
 66.8 N 159.0 W LI  
 56.6 N 137.2 W GI  
 341 550 213 457 483 626 484 303

S4=3.41%

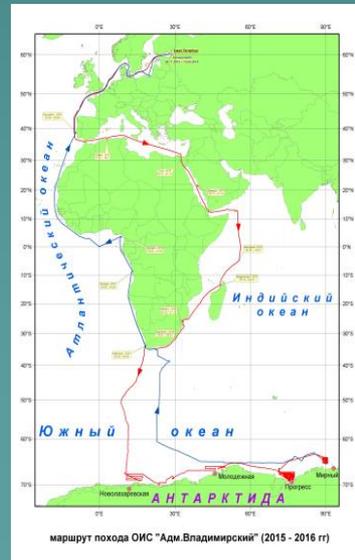
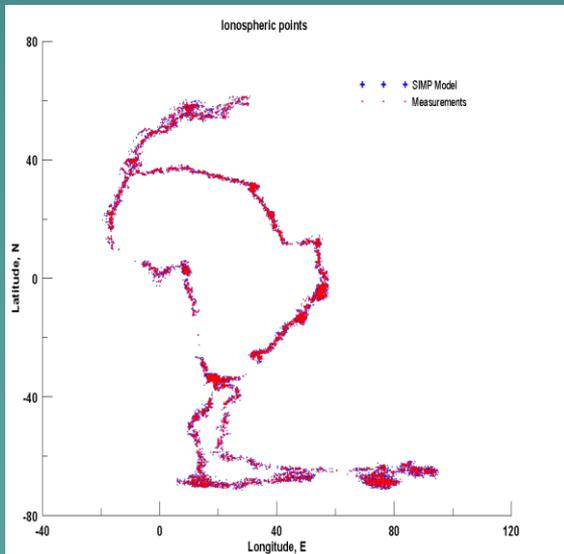
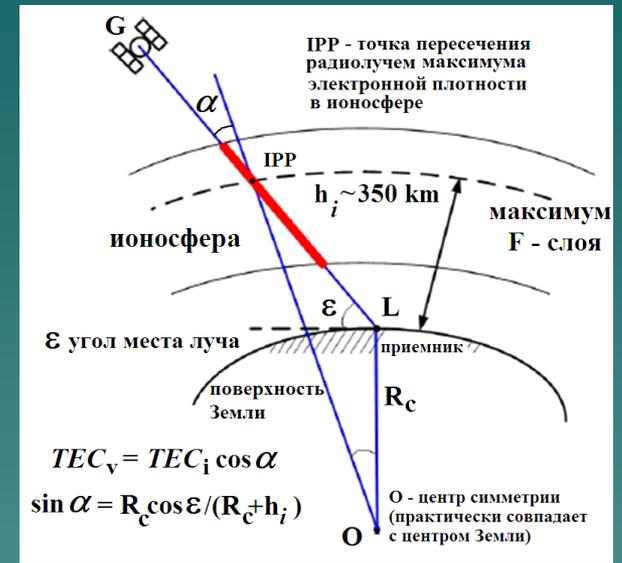
# Сопоставление данных радиозатменных измерений высотных профилей электронной концентрации в районе HAARP с моделью IRI 2012. Сеанс 14 июля 2011 года, 23 ч. 49 м. UTC. Частота 2.8 МГц.



Для зондирования ионосферы на трассах навигационные спутники-Земля (Смирнов В.М., Тынянкин С.И. Патент на полезную модель №93995 от 19.02.2010 «Аппаратно-программный комплекс ионосферного мониторинга») приемник и антенна АПК были установлены на корабле «Адмирал Владимирский» для измерений в ходе Антарктической экспедиции 06.11.2015 -15.04.2016 гг.



Географические координаты траекторий подионосферных точек, зарегистрированных в Антарктиде 21 января 2016 года

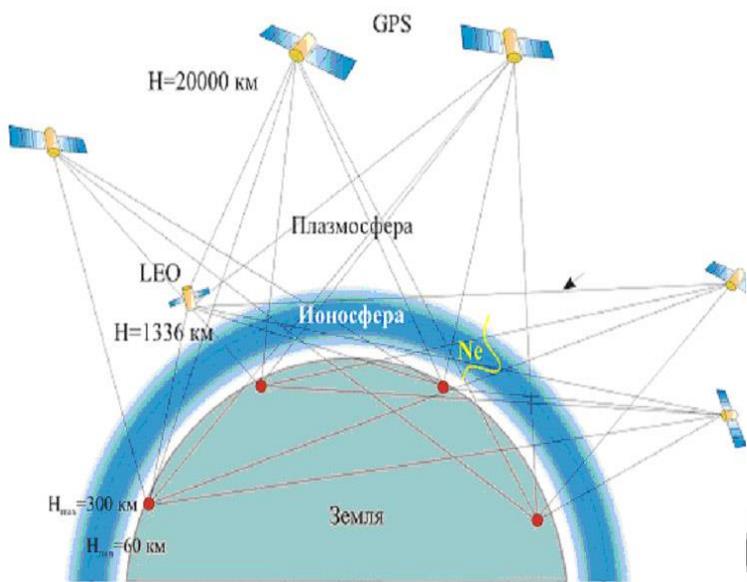


# Метод радиопросвечивания на трассе спутник-Земля, базирующийся на использовании глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS

**Конфигурация спутников, используемая в спутниковых методах зондирования ионосферы, и геометрия их проведения**

**Преимущества использования глобальных навигационных систем для мониторинга ионосферы Земли:**

- 1) возможность использования уже существующих спутниковых сигналов;
- 2) наличие хорошо развитой сети наземных пунктов международной геодезической службы;
- 3) применение для измерений штатных двухчастотных навигационных приемников;
- 4) данные двухчастотных измерений могут быть получены из многих источников, например, из баз данных IGS и CORS через Интернет, в едином формате RINEX;



Высотный профиль электронной концентрации ионосферы  
● Пункты наблюдения

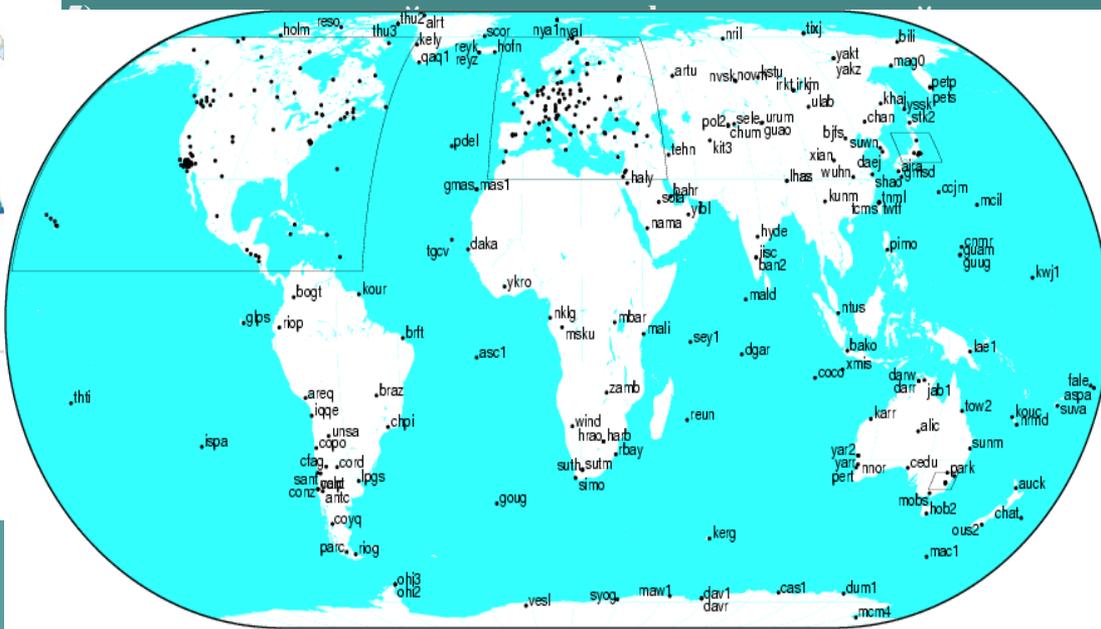
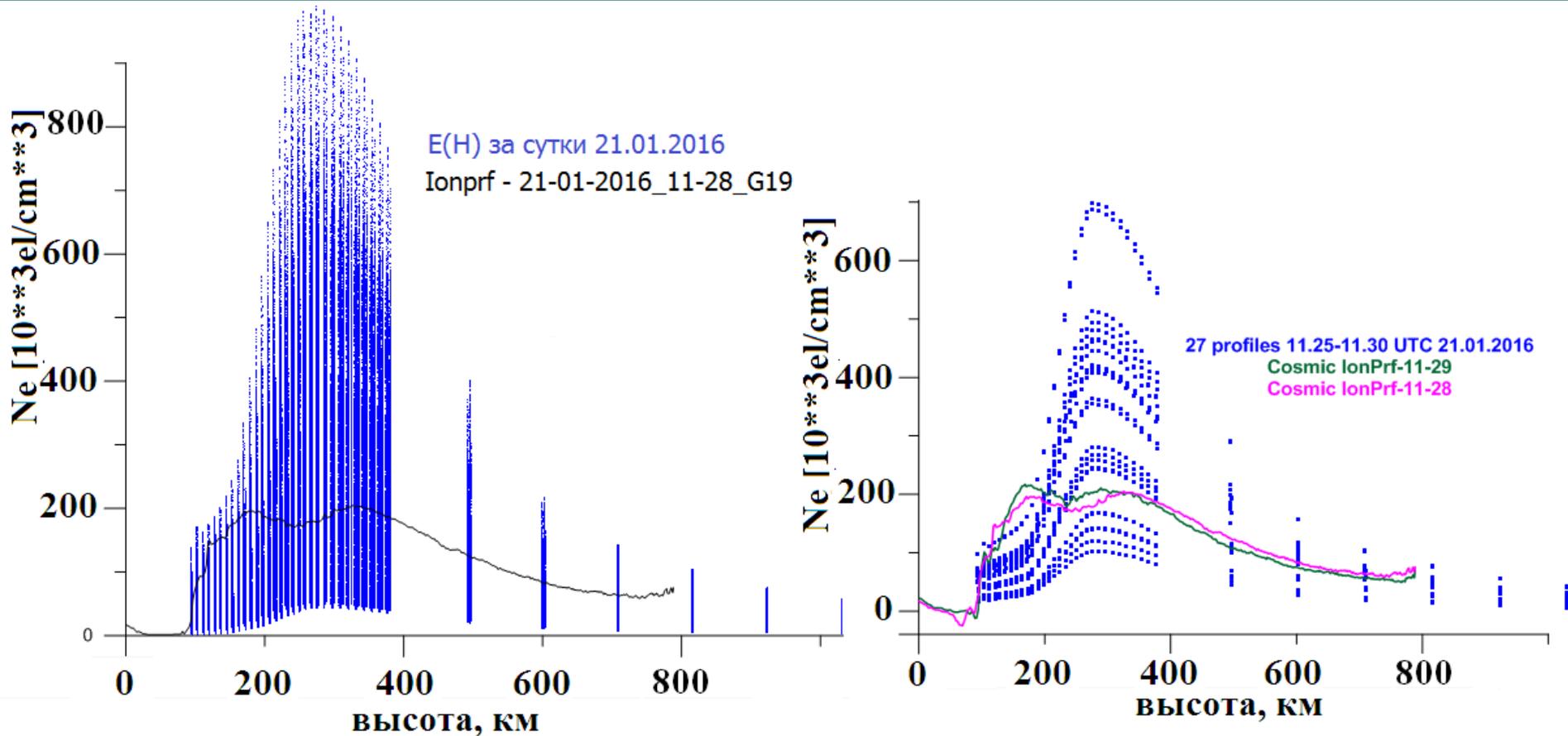
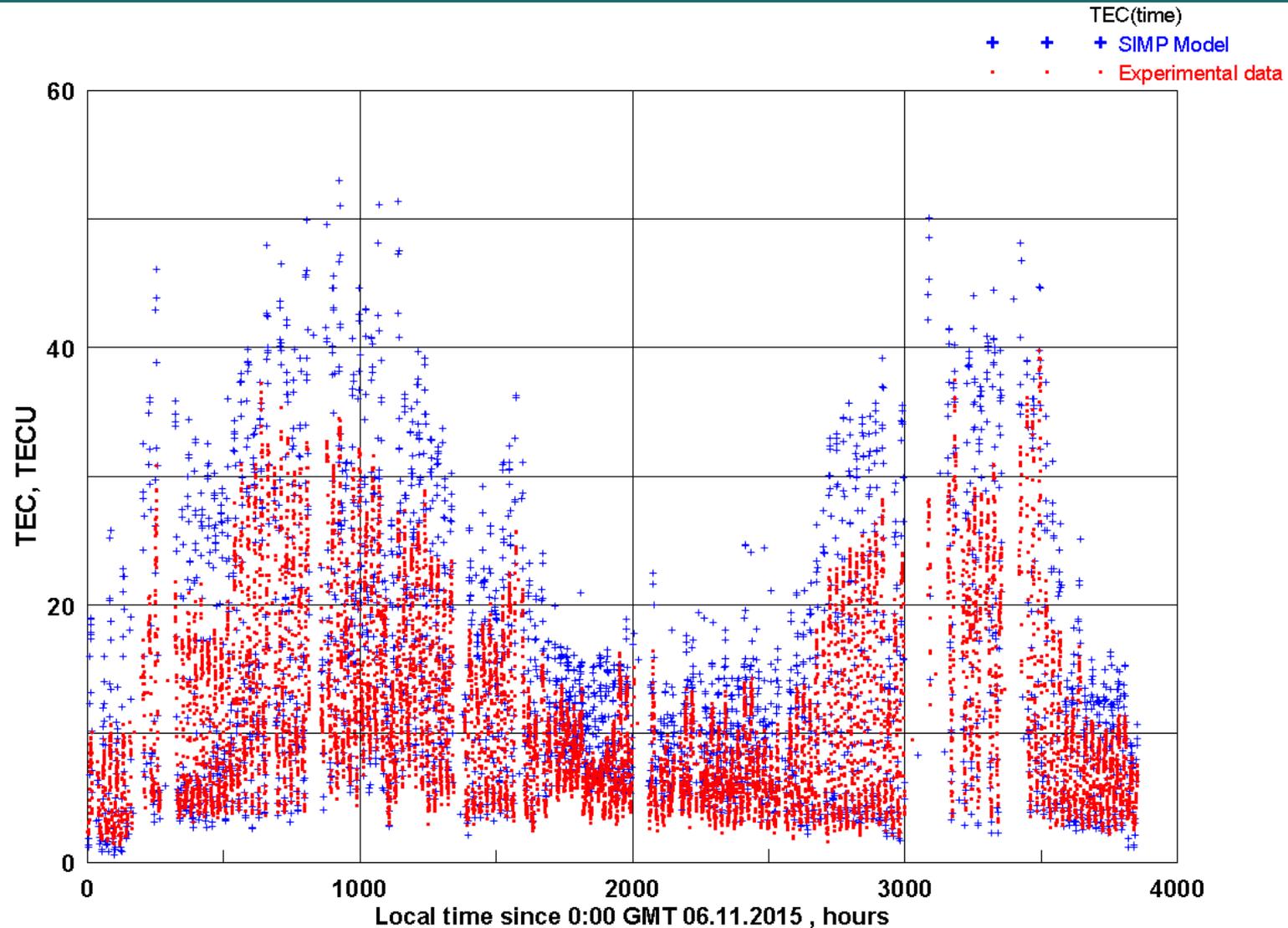


Иллюстрация радиопросвечивания ионосферы с использованием СРНС ГЛОНАСС и GPS

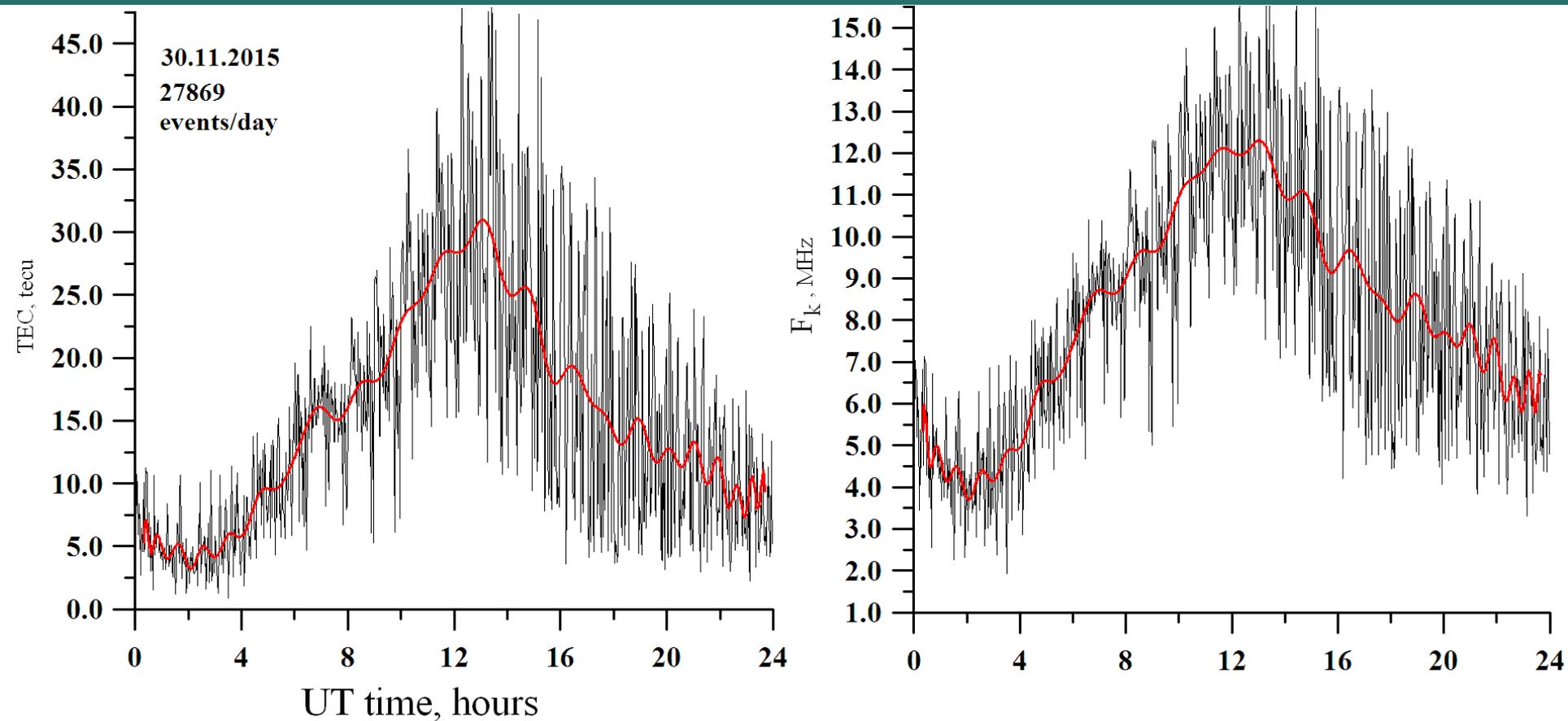
# Сопоставление высотных профилей электронной концентрации на трассах спутник-корабль (АПК) и спутник-спутник. Антарктида, 21 января 2016 года.



# Сопоставление интегральной электронной концентрации на трассе спутник-корабль (АПК) с моделью SIMP.

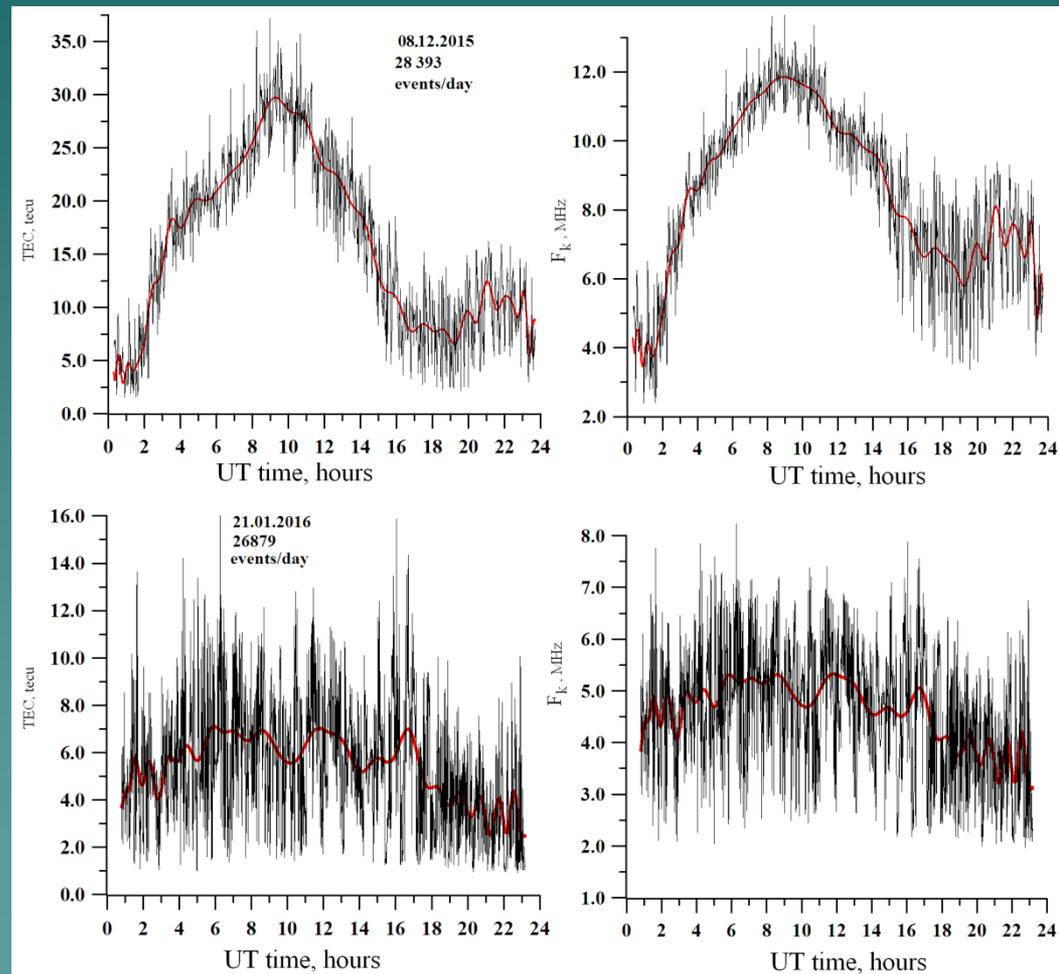
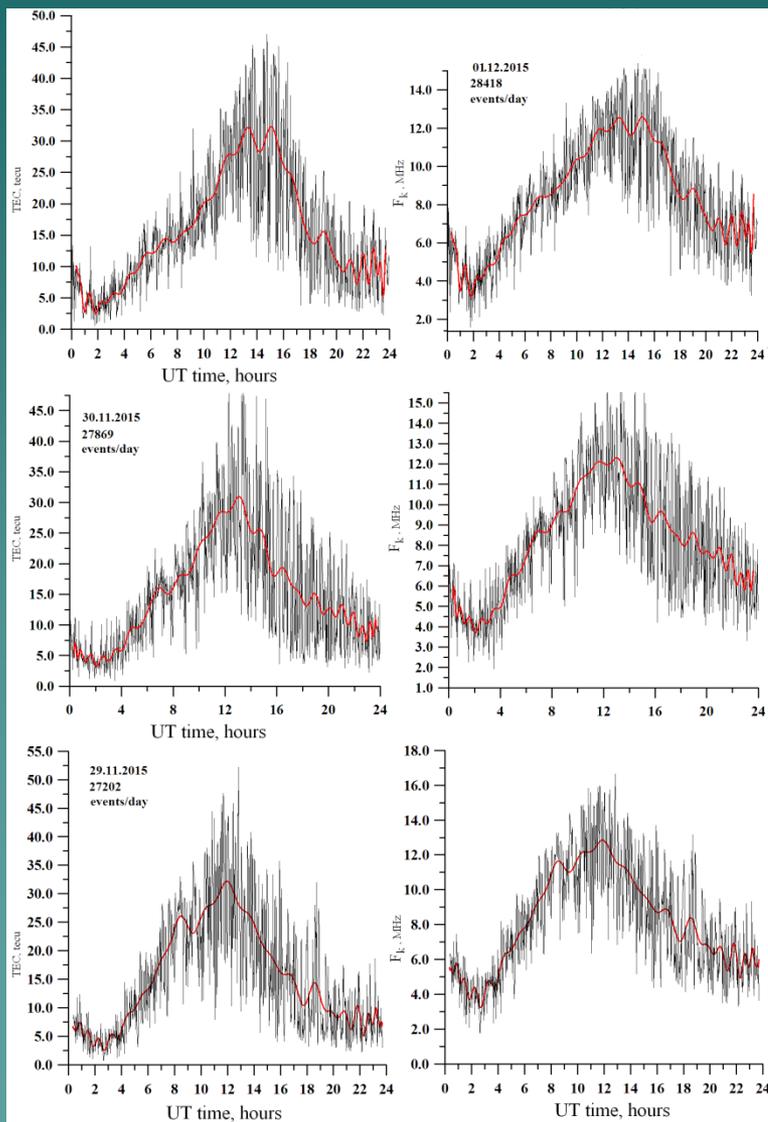


# Суточные вариации интегральной электронной концентрации и критической частоты F-слоя на трассе спутник-корабль (АПК) 30 ноября 2015 года, 27869 сеансов.

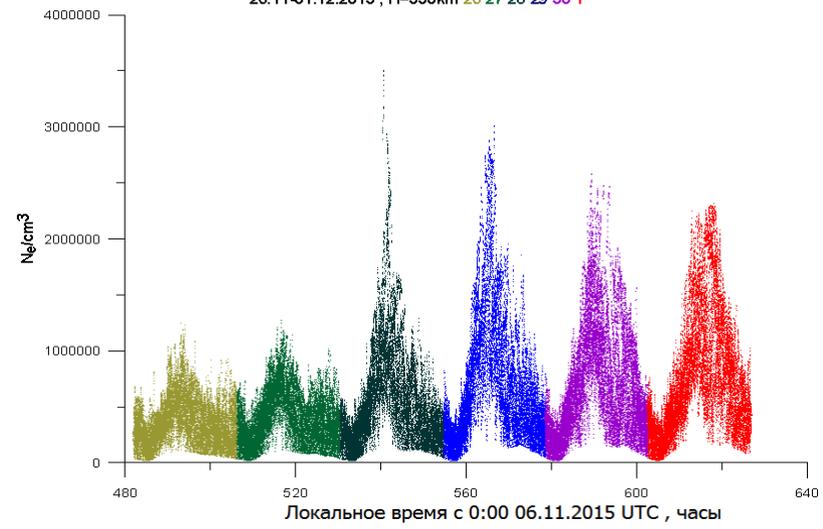
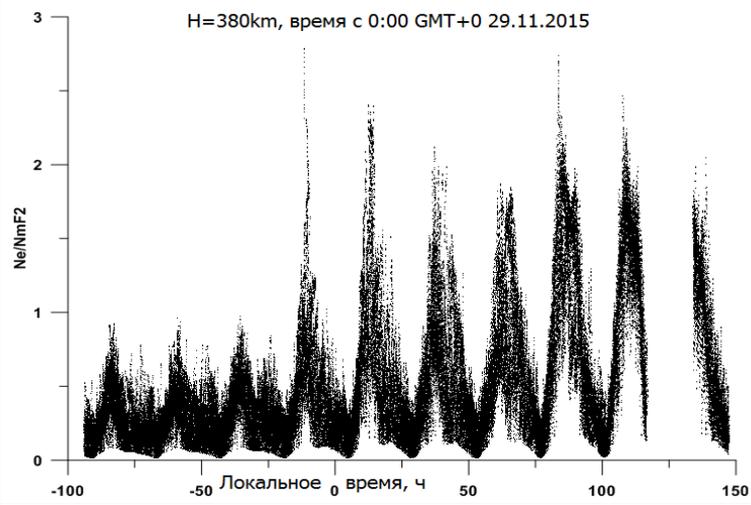
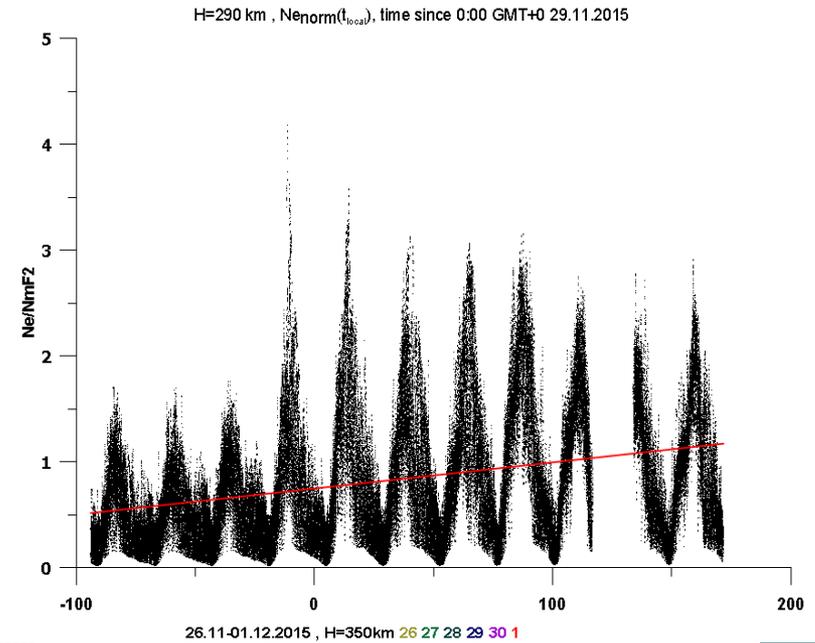
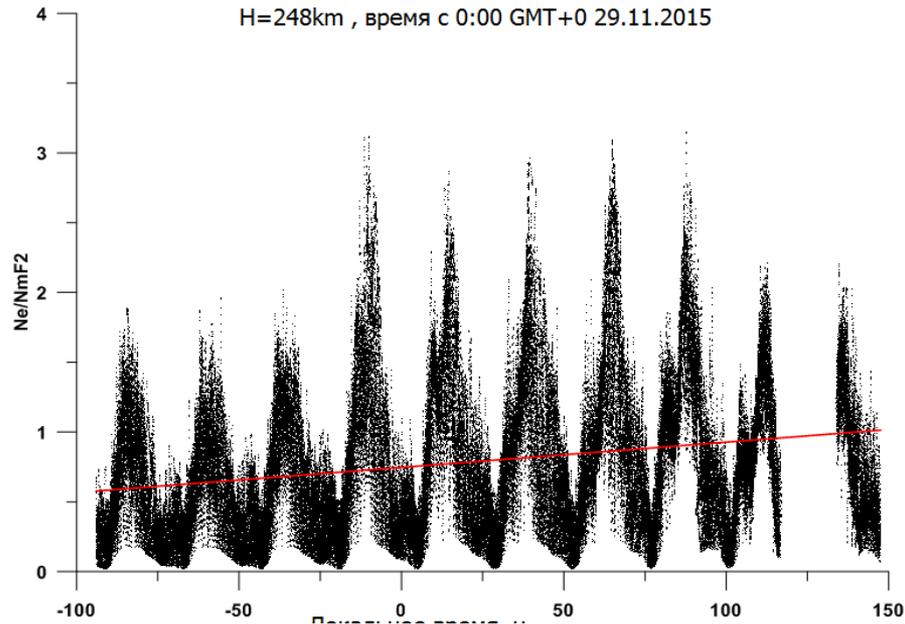


$F_x$ 

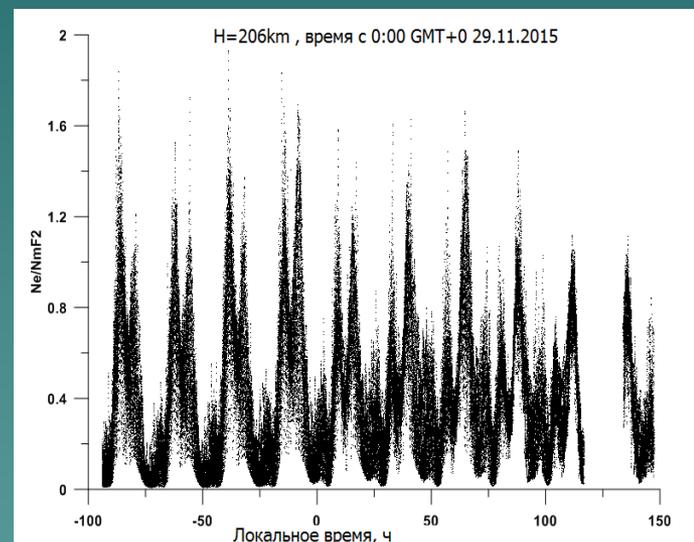
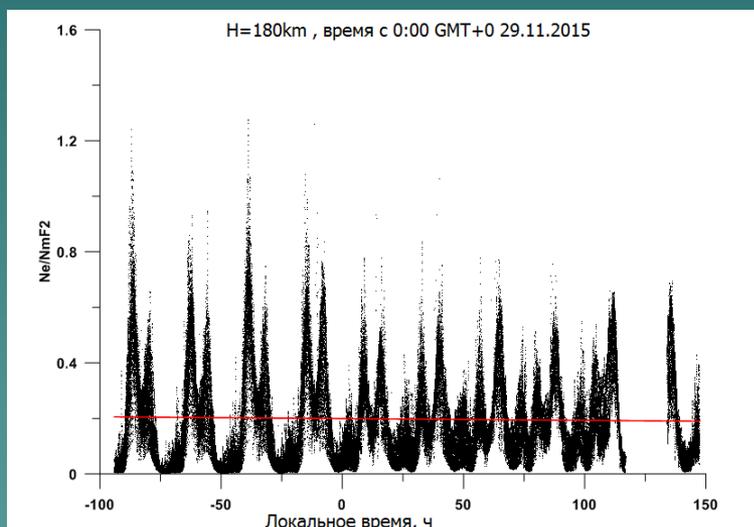
# Результаты 24-часовых измерений критических частот максимума F-слоя и интегральной электронной концентрации. Внизу справа - данные, полученные в полярном овале Антарктиды.



Изменение нормированной электронной концентрации (НЭК) на высоте 290 км (слева) и 248 км (справа) с 00 ч. 29 ноября по 10 декабря 2015 года. Красная линия указывает тренд роста электронной концентрации.



Наблюдение кратковременных (с периодом меньше суток) вариаций электронной плотности на высотах 180 и 206 км во время ионосферного возмущения с 29 ноября по 09 декабря 2015 года (Джидда, Саудовская Аравия).



Направления внедрения результатов исследований на трассе спутник-Земля:

- Создание специализированных электронных баз гелиогеофизических данных.
- Разработка (уточнение) методик оценки влияния гелиогеофизической обстановки на качество приема радиосигналов глобальных спутниковых систем (GLONASS, GPS).
- Уточнение перечня опасных и стихийных явлений для линий радиосвязи в КВ диапазоне
- Подготовка предложений по внедрению технологии зондирования ионосферы с морских судов и движущихся объектов.
- Подготовка предложений по модернизации существующих и созданию перспективных технических средств мониторинга гидрометеорологической, гелиогеофизической обстановки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение для зондирования на трассах спутник-спутник и спутник Земля сигналов навигационных космических систем дает возможность определять параметры ионосферы практически для любого региона поверхности Земли.
2. Для трасс спутник-Земля эта возможность основана на использовании универсальных навигационно-геодезических приемников, позволяющих регистрировать и автоматически обрабатывать сигналы навигационных спутников практически в любой точке земной поверхности. Зона действия одного приемника охватывает область, радиус которой больше 1000 км. Проведенный анализ данных выявил достаточно высокую точность и большую информативность измерений, связанную с наличием практически неограниченного объема проведенных сеансов (~ 30000 в день), при определении критической частоты, полного электронного содержания, вертикального и горизонтального распределения электронной плотности.
3. С помощью радиозатменной системы FORMOSAT-3/COSMIC проведено 117 измерений вертикального профиля электронной концентрации ионосферы вблизи мощного передатчика HAARP. В одном из сеансов выявлена существенная анизотропия неоднородностей в ионосфере над станцией HAARP.

Автор признателен оргкомитету за приглашение и финансовую поддержку на конференции .

Спасибо за внимание!