



Восемнадцатая Всероссийская Открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА ИКИ РАН, 2020



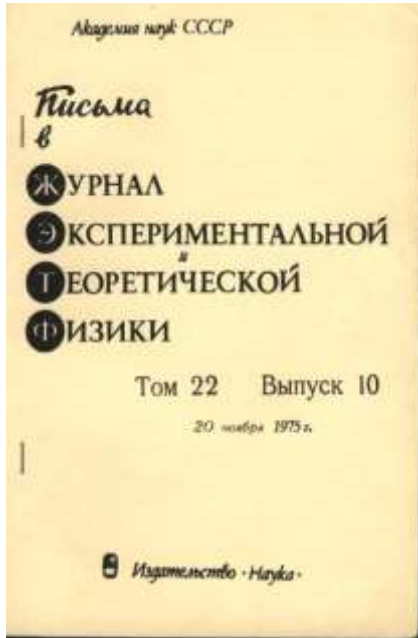
Исследование регулярных и спорадических явлений в нижней ионосфере Земли на базе стенда СУРА

Н.В.Бахметьева, Г.И.Григорьев, И.Н.Жемяков,
Г.Р.Виноградов, Е.Е.Калинина, К.М.Юсупов

НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского,
Казанский (Приволжский) федеральный
университет

При поддержке РФФ – грант № 20-17-00050

Первое наблюдение рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях (ИПН)



В.В. Беликович,
Е.А. Бенедиктов,
Г.Г. Гетманцев,
Ю.А. Игнатъев,
Г.П. Комраков
1975 г.



Нижняя ионосфера (высоты 50–150 км)

- Сложный химический состав.
- Низкая электронная концентрация в D-области.
- Температура нейтральной компоненты, достигающая локального минимума на уровне мезопаузы, возрастает при переходе к термосфере.
- Вертикальные и горизонтальные движения среды влияют на параметры нейтральной и ионизованной компонент нижней ионосферы.
- Спорадические слои E разного типа, в том числе, короткоживущие, образуются на высотах 90–130 км под действием атмосферных волн.
- Турбулентность, развивающаяся на высотах ниже уровня турбопаузы, влияет на характеристики радиосигналов.

Нагревный стенд СУРА - 56,15 N; 46,11 E

Непрерывное излучение

Нагрев ионосферы

Исследование нагревных явлений

МЧО

Вертикальное зондирование ионосферы при нагреве; механизмы и параметры развития возмущений; мезосферный озон

ИПН

Развитие и релаксация; высотно-временные особенности; процессы в ионосфере

Импульсное излучение

Диагностика

Параметры регулярной ионосферы и нейтральной атмосферы

МЧО

Исследование D-области; N(h)-профиль; Горизонтальный и вертикальный ветер; турбулентность вспышки и пр.; Рекомбинация, аэрономия

ИПН

N(h)-профиль, слой Es –ионы металлов; температура и плотность - T, ρ, высота турбопазы, турбул. скорость; вертикальная скорость, перенос, атмосферные волны; расслоение D-области (слой C)

Образование ИПН и диагностика ионосферы

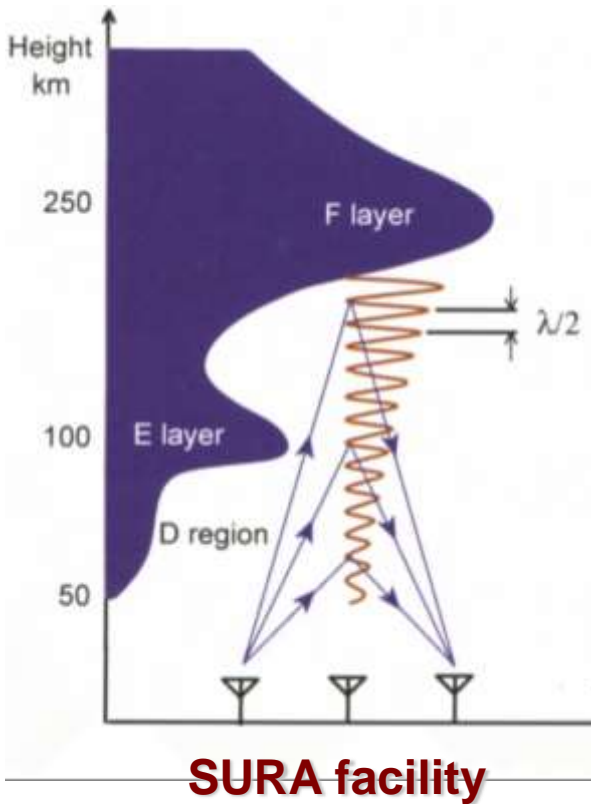


Схема образования
ИПН ионосферной
плазмы и диагностики
ионосферы

Создание ИПН – в поле мощной стоячей радиоволны с длиной волны $\Lambda = \lambda_{\text{нагр}}/2$ при работе нагревного стенда.

Физика образования ИПН: в нижней ионосфере – тепловые эффекты:

90–150 км – E -область – диффузионное перераспределение неравномерно нагретой плазмы; 50 – 90 км – D-область – температурная зависимость коэффициента прилипания электронов к молекулам атомарного кислорода;

F-область – действие стрикционной силы

Диагностика ИПН: вертикальное зондирование КВ локатором на длине волны

$\lambda = \lambda_{\text{нагр}}$ – условие резонансного рассеяния радиоволн на ИПН; $\lambda_{\text{нагр}}$ – длина мощной волны в плазме, λ – длина волны радиолокатора.

Некоторые характеристики искусственных периодических неоднородностей

$\Delta N(h, t) = A \cos(Kh) \exp(-t / \tau)$ изменение концентрации в ИПН

$$A = \left[1 - \frac{\eta(T_{e0} + T_{i0})\tau_d}{2T_{e0}\tau_r} \right] \frac{N_0 \Delta T_e}{(T_{e0} + T_{i0})(1 + \tau_d / \tau_r)},$$

амплитуда изменений концентрации

$\tau^{-1} = \tau_d^{-1} + \tau_r^{-1}$, τ_d – диффузионное и $\tau_r = 1/(2\alpha_0 N_0)$ – рекомбинационное время; η – характеризует температурную зависимость эффективного коэффициента рекомбинации.

В Е-области при создании ИПН на $f \approx 4\text{--}6$ МГц $\tau_r \gg \tau_d$ и $\tau = \tau_d$

$$A = N_0 \Delta T_e / (T_{e0} + T_i).$$

$$\text{Скорость } V = \frac{\lambda}{4\pi} \frac{d\Phi}{dt} = \frac{c}{4\pi n f} \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

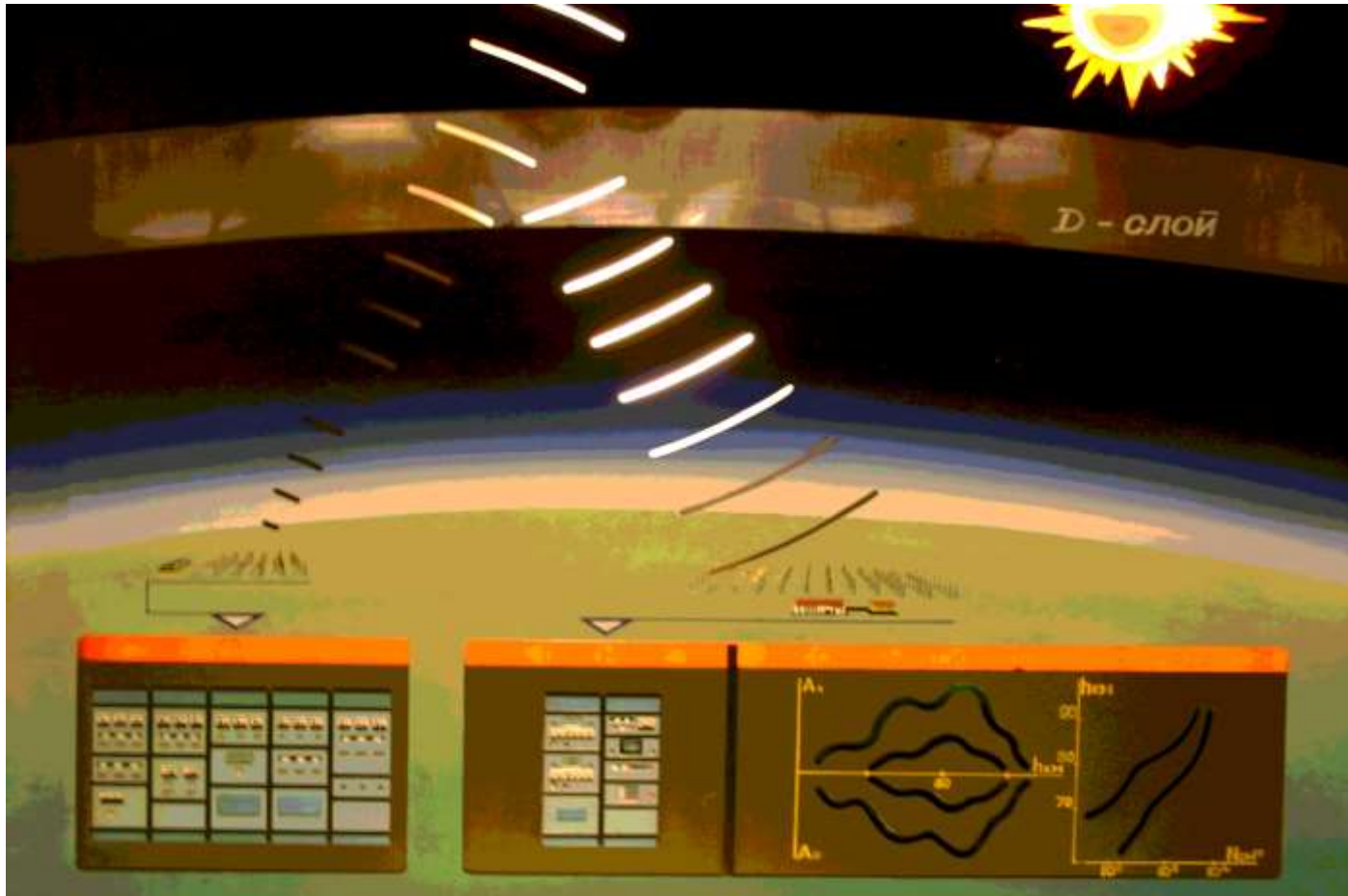
$$\tau = \tau_d = \frac{1}{K^2 D} = \frac{M_i v_{im}}{\kappa(T_{e0} + T_{i0}) K^2},$$

время релаксации неоднородностей

$$\frac{\Delta N}{N} \approx 10^{-4} - 10^{-3} \text{ в Е-области}$$

$$\frac{\Delta N}{N} \approx 10^{-3} - 10^{-2} \text{ в D-области}$$

Исследование D-области методом частичных отражений – рассеяние на естественных неоднородностях плазмы



Излучение пробных радиоволн

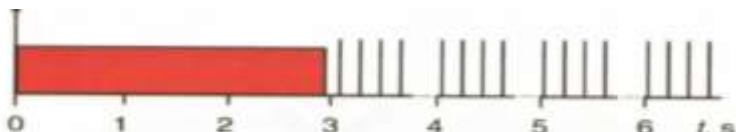
Прием рассеянных сигналов

Приемная часть установки частичных отражений



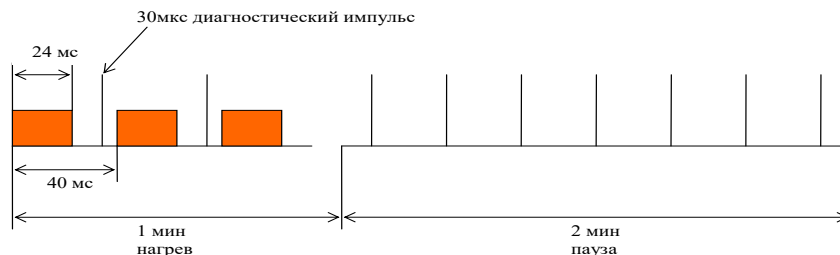
Используется для регистрации сигналов, рассеянных естественными и искусственными неоднородностями ионосферной плазмы

Диаграммы работы стенда СУРА для создания и локации ИПН



Создание ИПН, непрерывный нагрев: стенд СУРА – нагрев в течение 3 с, $f_{нагр} = 4,7$ (5,6) МГц, необыкновенная поляризация.

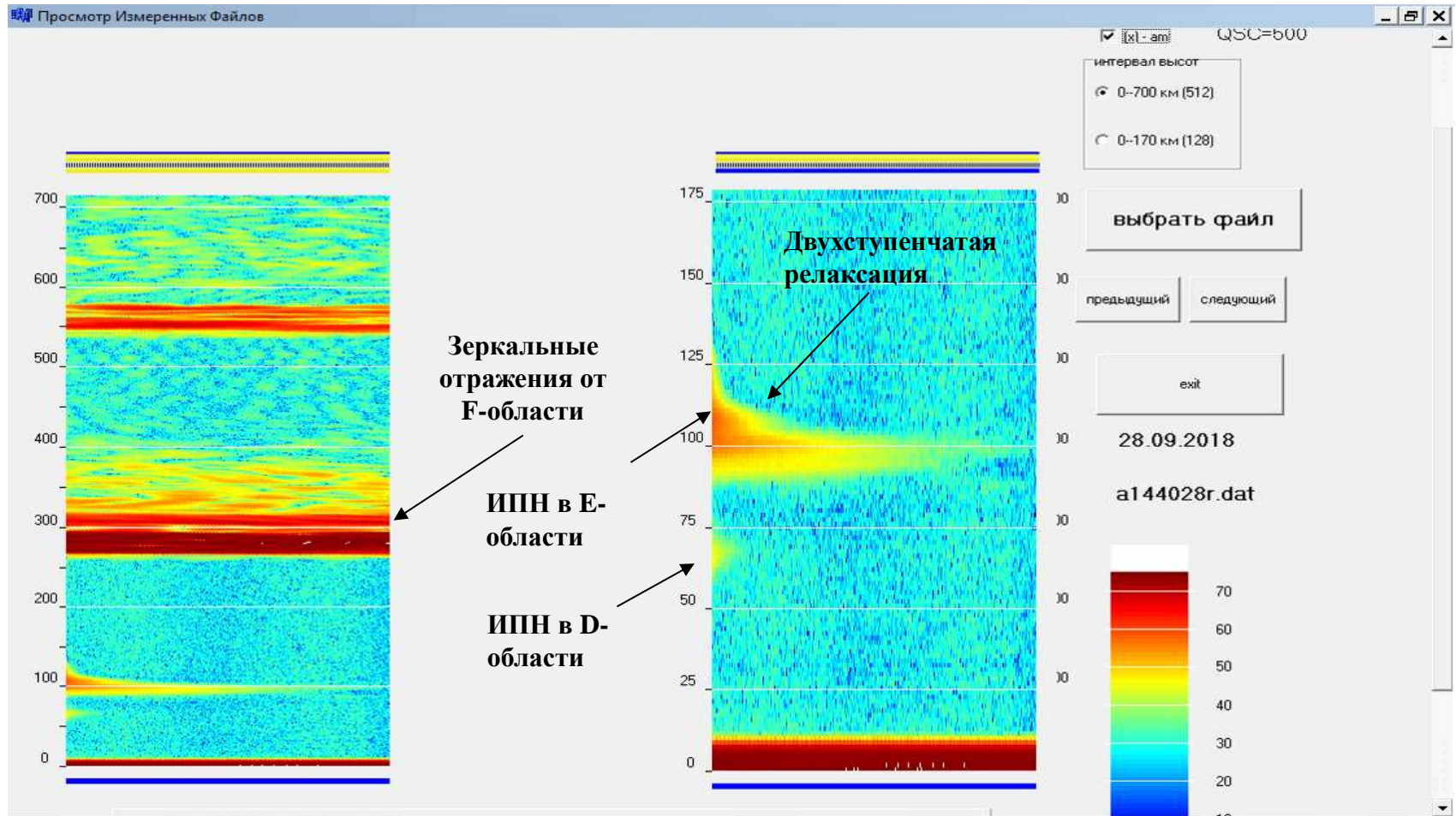
Диагностика ИПН в период релаксации неоднородностей после окончания нагрева – в течение 12 с : стенд СУРА в импульсном режиме с $\tau = 30$ мкс, $F_{повт} = 50$ Гц, излучает на той же частоте $f_{нагр}$ и той же поляризацией.



Создание ИПН, квазинепрерывный нагрев : стенд СУРА – нагрев в течение 1 минуты (режим с «врезками») пауза 2 минуты, $P_G = 100-170$ МВт, $f_H = 4,785$ (5,6) МГц, X(O)-поляризация.

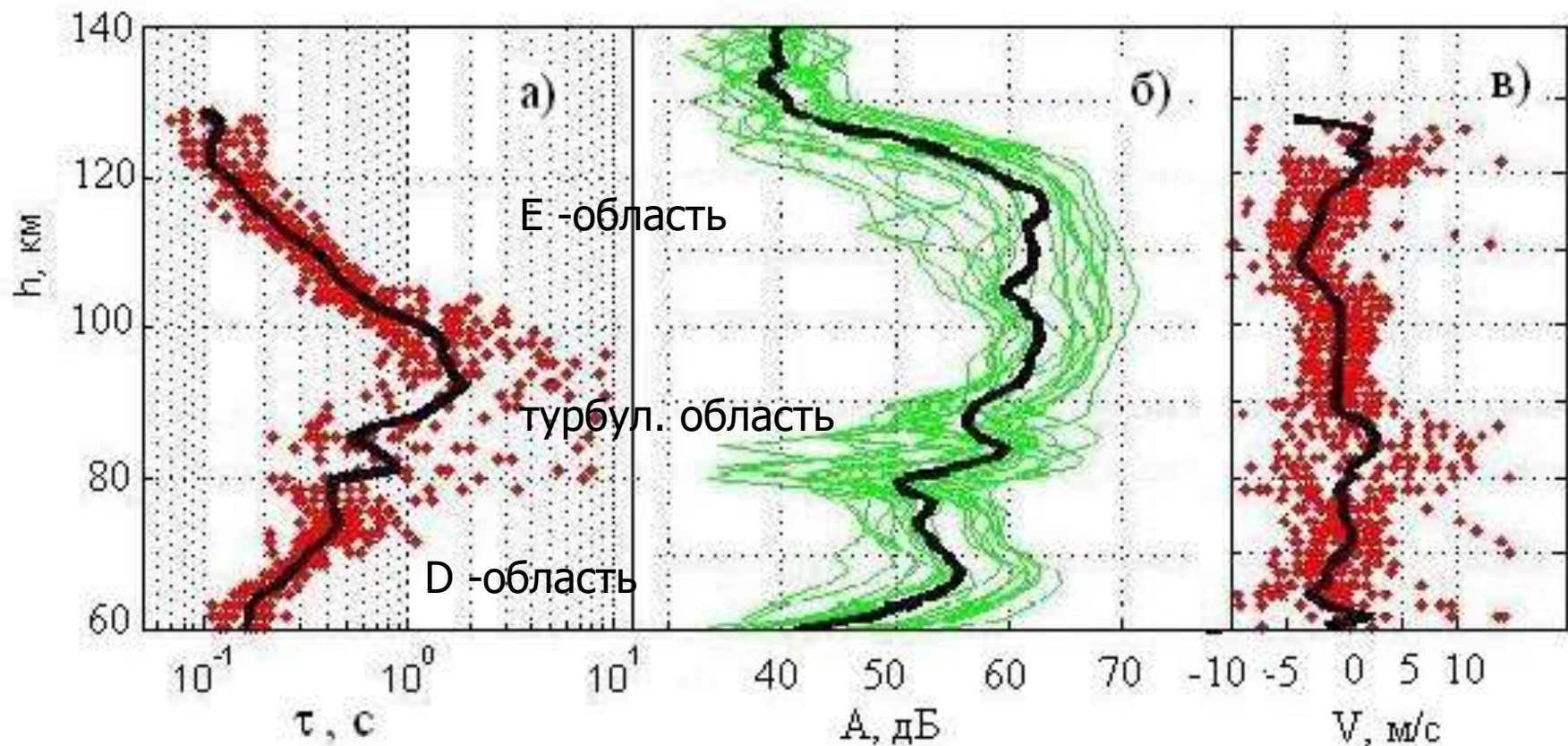
Диагностика в импульсном режиме во время создания и релаксации неоднородностей $f = 4,785$ МГц (5,6), X-компонента, $\tau = 30$ мкс, $F_{повт} = 50$ Гц.

Релаксация ИПН 28.09.2018, $f=4,7$ МГц, СУРА



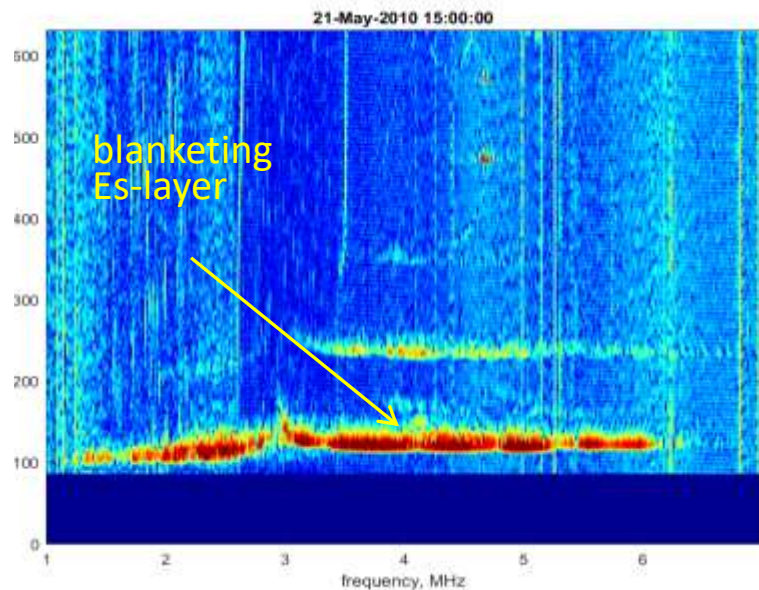
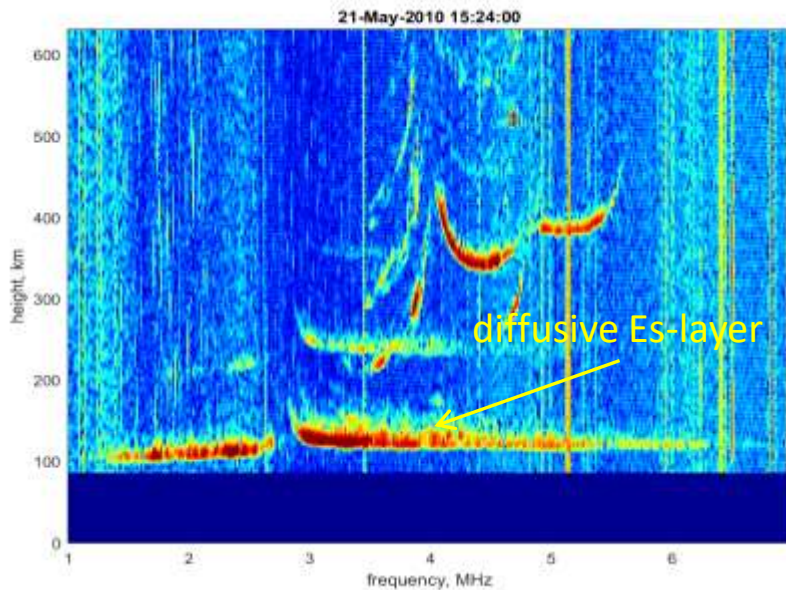
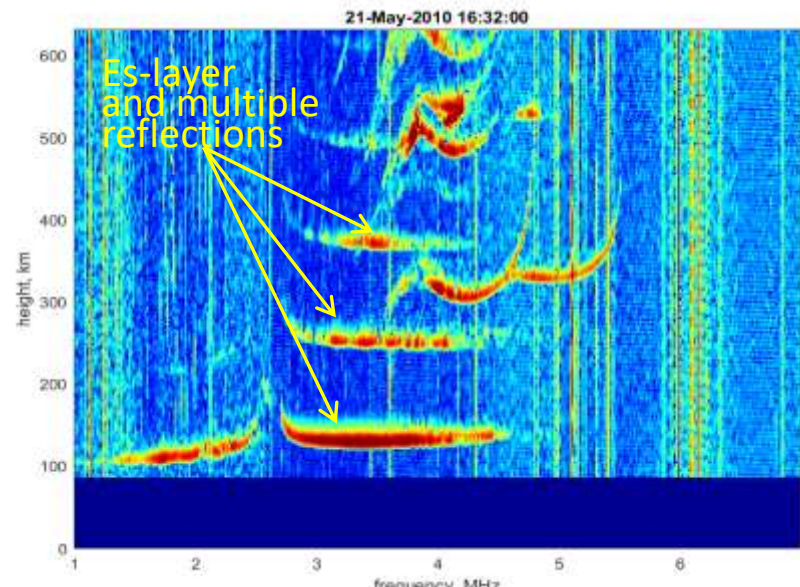
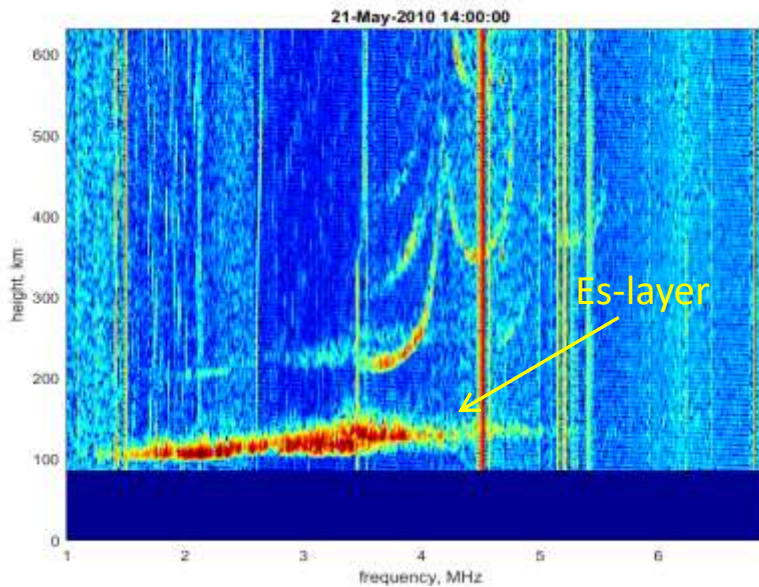
Скриншот программы Просмотра Измеренных Файлов (ПИФ): амплитуды сигналов (яркостная шкала) в диапазоне действующих высот 0-700 км (слева) и только в нижней ионосфере (справа). Пример двухступенчатой (быстрой и медленной) релаксации сигнала в E-области

Высотно-временные характеристики рассеянного сигнала 30.09.2016

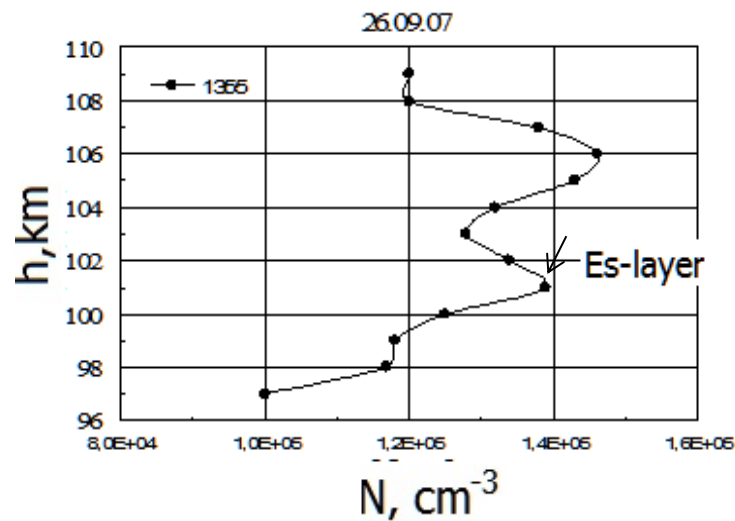
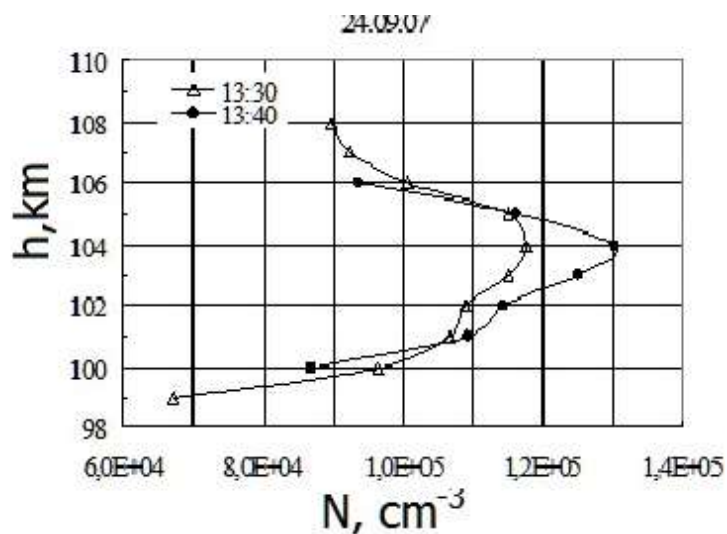
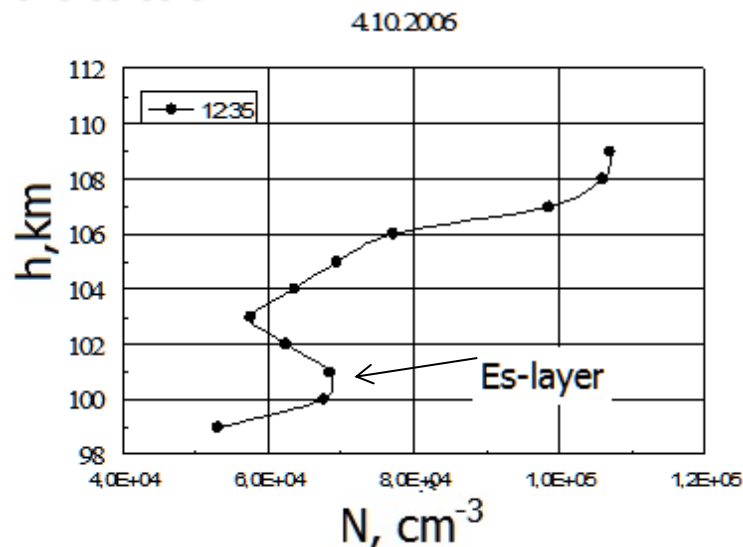
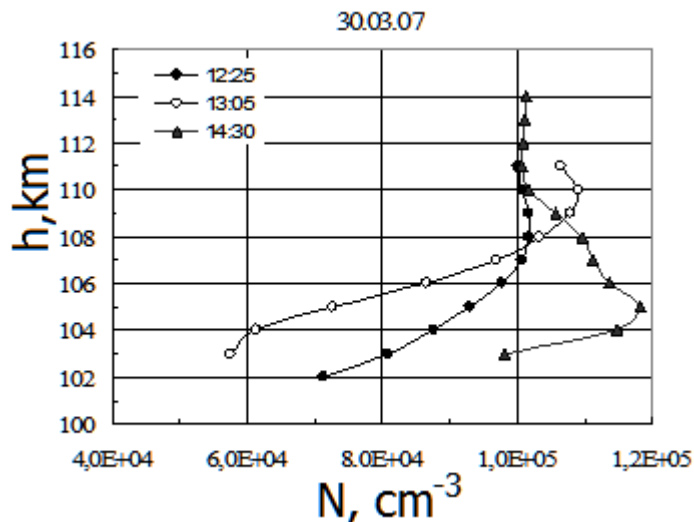


Высотные профили времени релаксации τ – а); амплитуды A – б) и скорости вертикального движения плазмы V – в) для сеанса 13:54-13:58

Спорадический слой E (E_s) на ионограммах ионозонда «Циклон», Казань



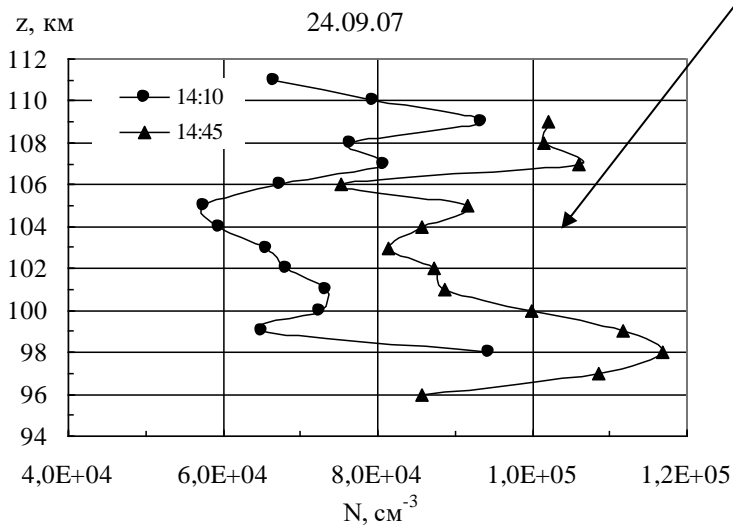
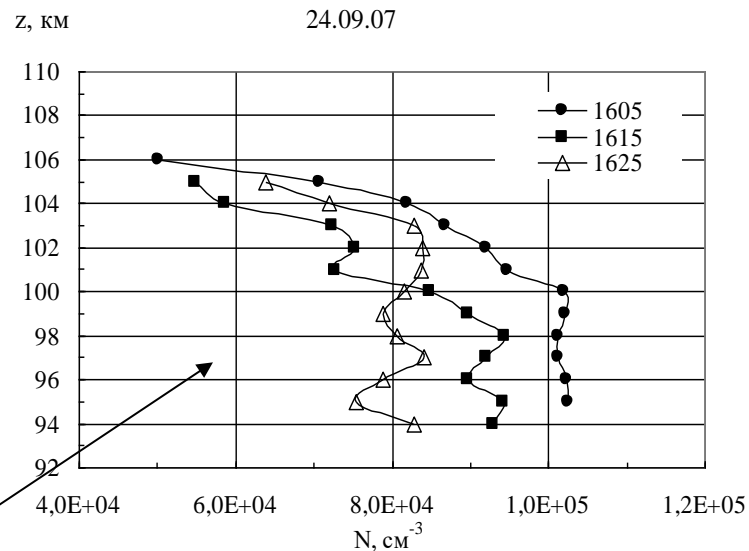
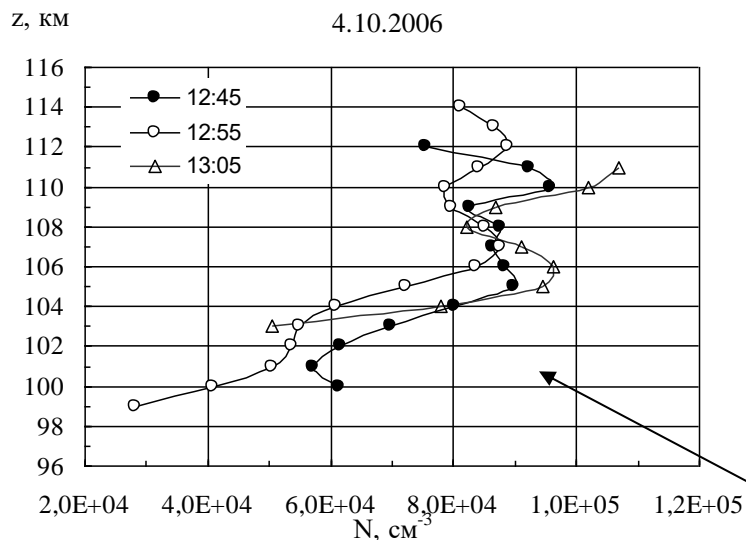
Типы N(h)- профилей в E-области, полученные методом ИПН



Регулярные N(h)-профили

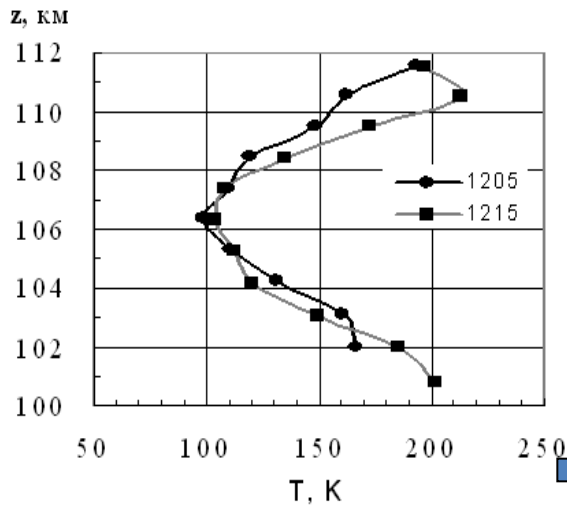
N(h)-профили со спорадическим
слоем E

Примеры N(h)-профилей с нерегулярными изменениями электронной концентрации по высоте

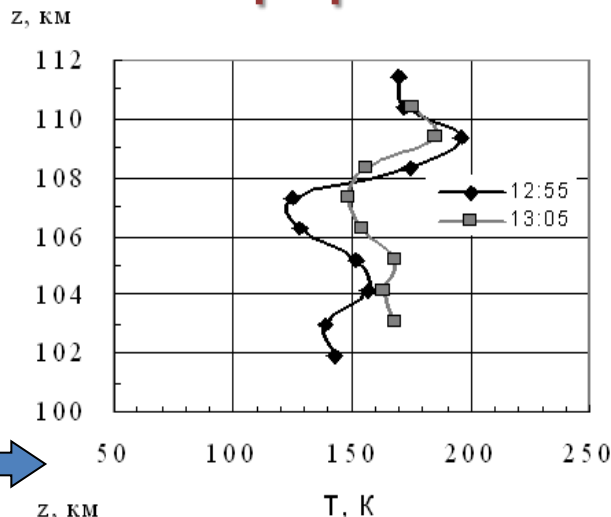


Тонкая структура E-области ионосферы, расслоения, возможность получать N(z)-профиль и в случае, когда наблюдается спорадический слой E; используется при расчете температуры и плотности нейтральной компоненты; погрешность определения N(z)-профиля не превышает 10 %.

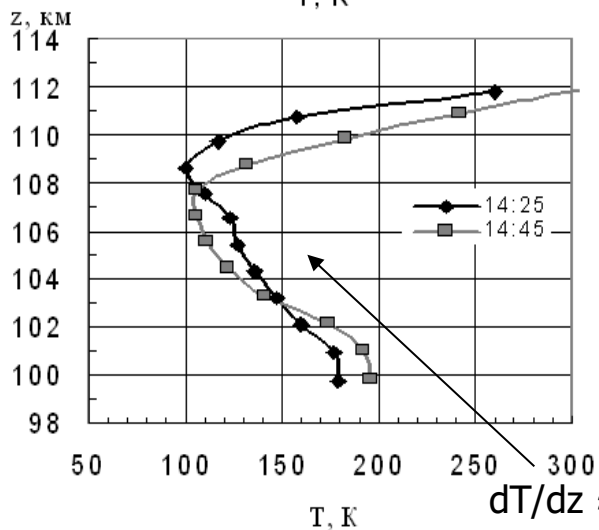
Примеры высотных профилей температуры атмосферы



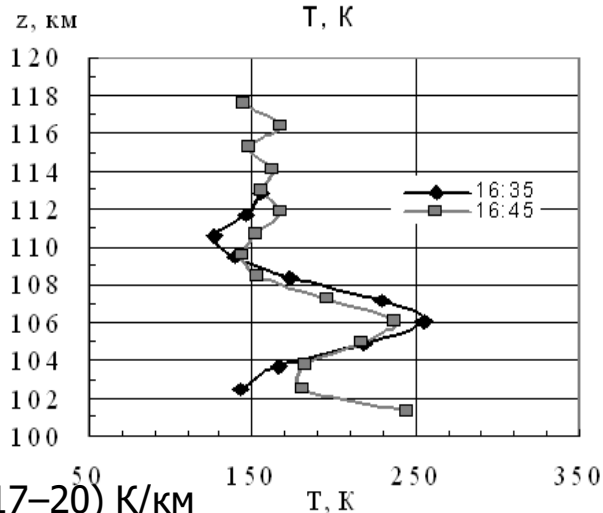
a)



б)



в)



г)

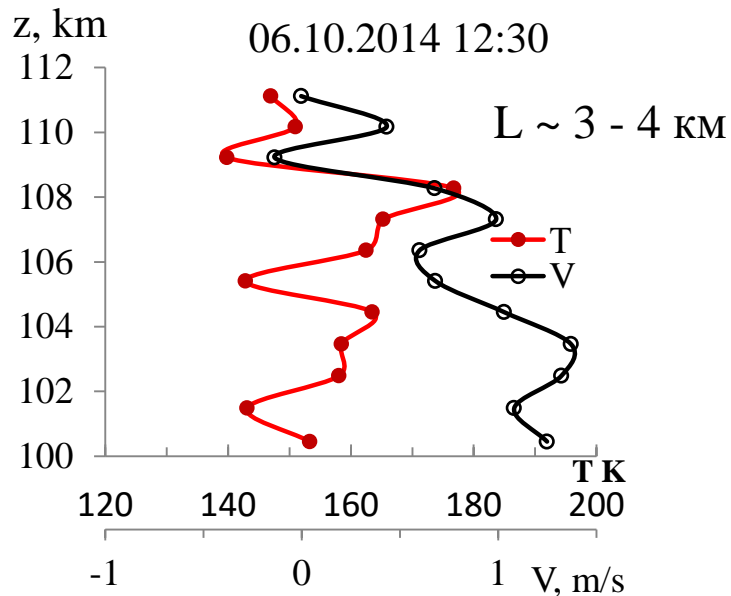
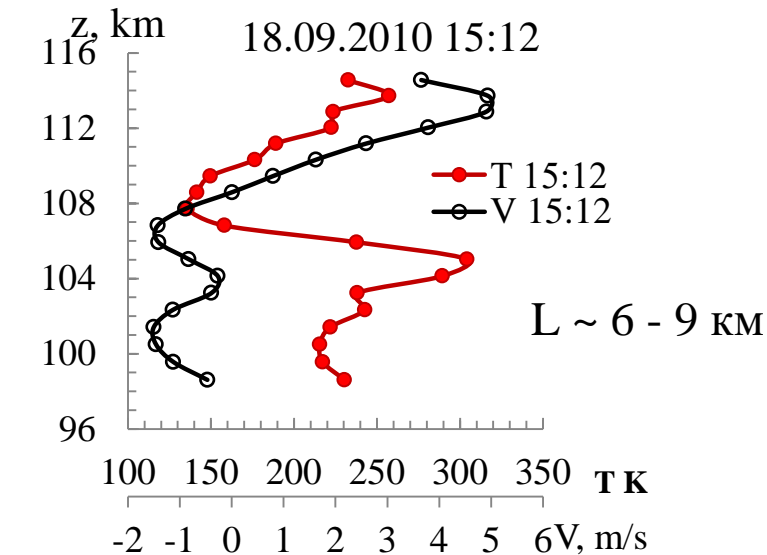
Сделан вывод о том, что наблюдавшиеся в эксперименте отрицательные температурные градиенты, достигавшие -25 К/км приводили к последующим возмущениям атмосферных параметров: температуры, плотности, вертикальной скорости

типичные гладкие «спокойные» профили с минимумом температуры на высоте $z = 106-108$ км



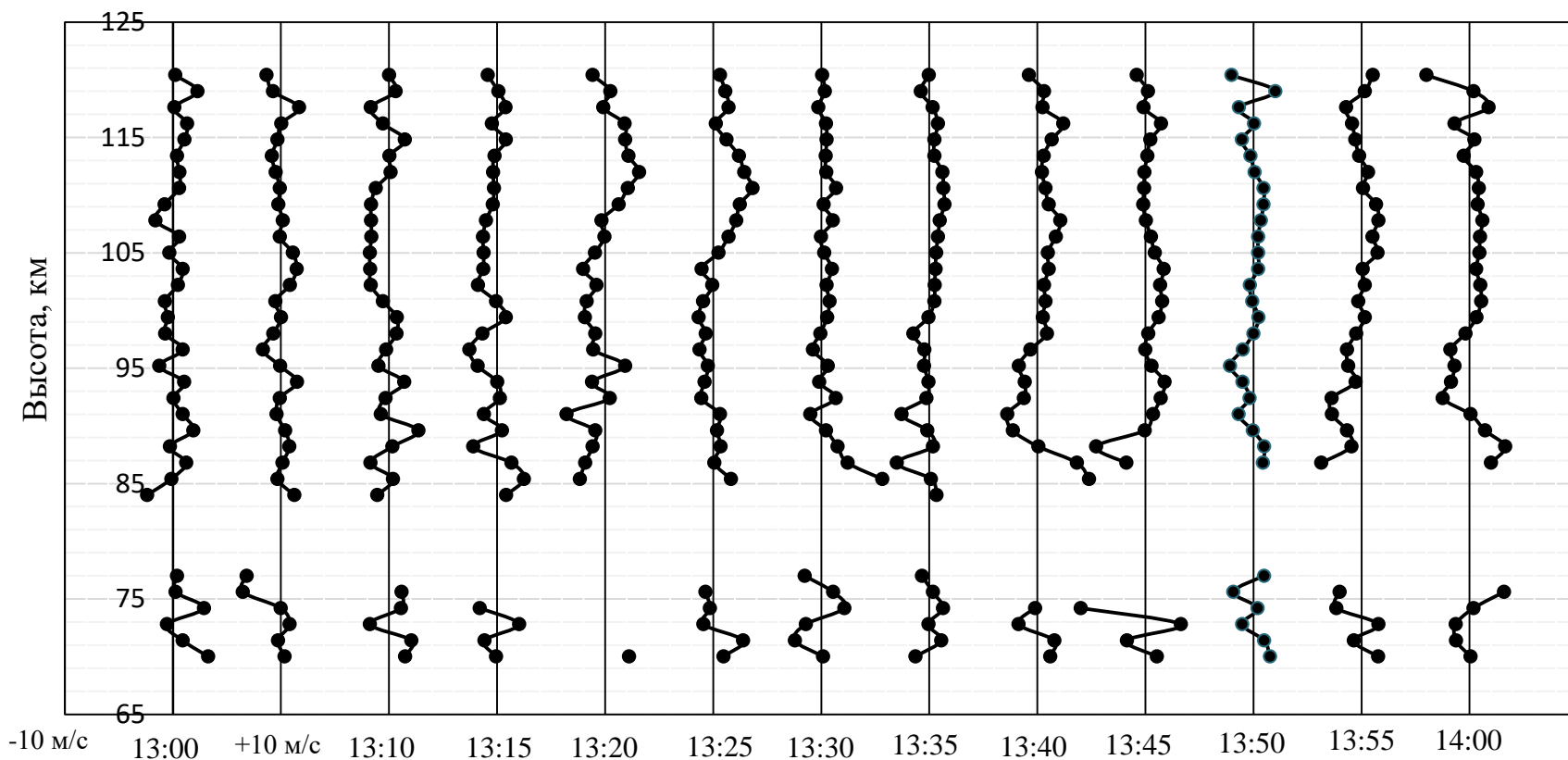
«возмущенные» профили температуры

Характерные примеры высотных профилей температуры и вертикальной скорости



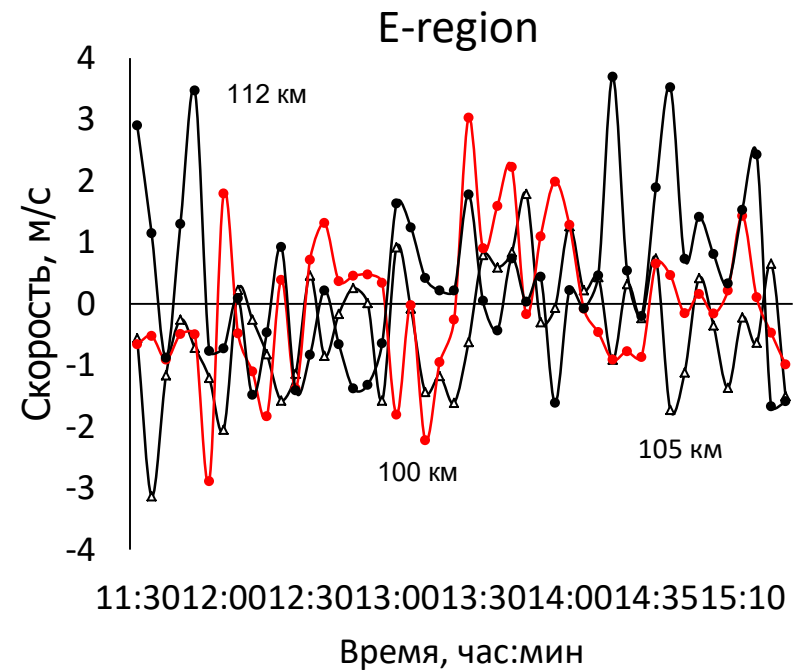
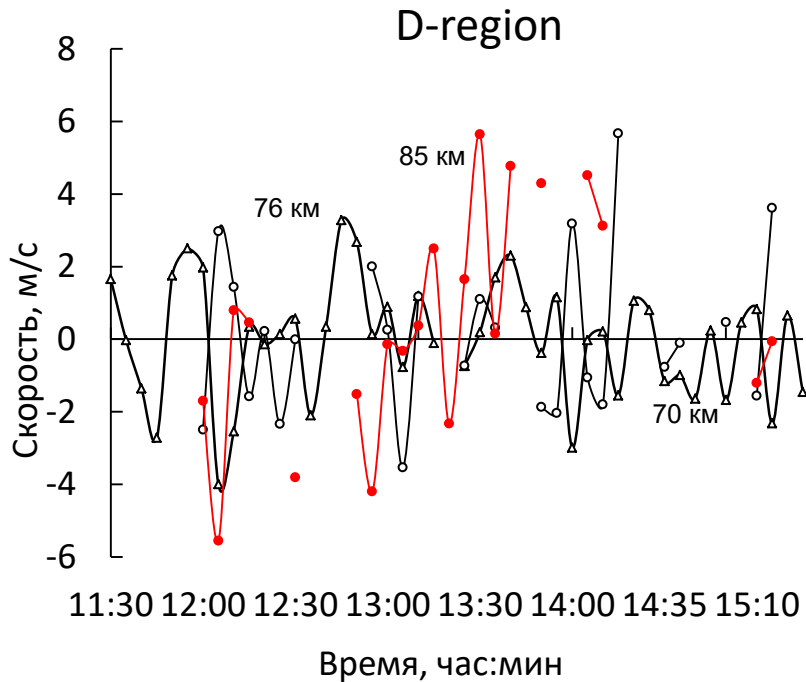
Изменения температуры и скорости находятся в фазе, т. е., максимальная температура достигается на той же высоте, что и максимальная скорость. В обоих случаях можно говорить о волновых движениях с вертикальным масштабом L от 3 до 9 км. Вариации 18.09.2010 наблюдались в период, когда имела место конвективная неустойчивость.

Скорость вертикального движения в D- и E-областях



Высотные профили скорости вертикального движения плазмы **28.09.2018** за период наблюдений с 13:00 до 14:00. Усреднение по времени 5 минут. Положительные значения – движение вниз. Постоянная смена направления скорости с высотой .

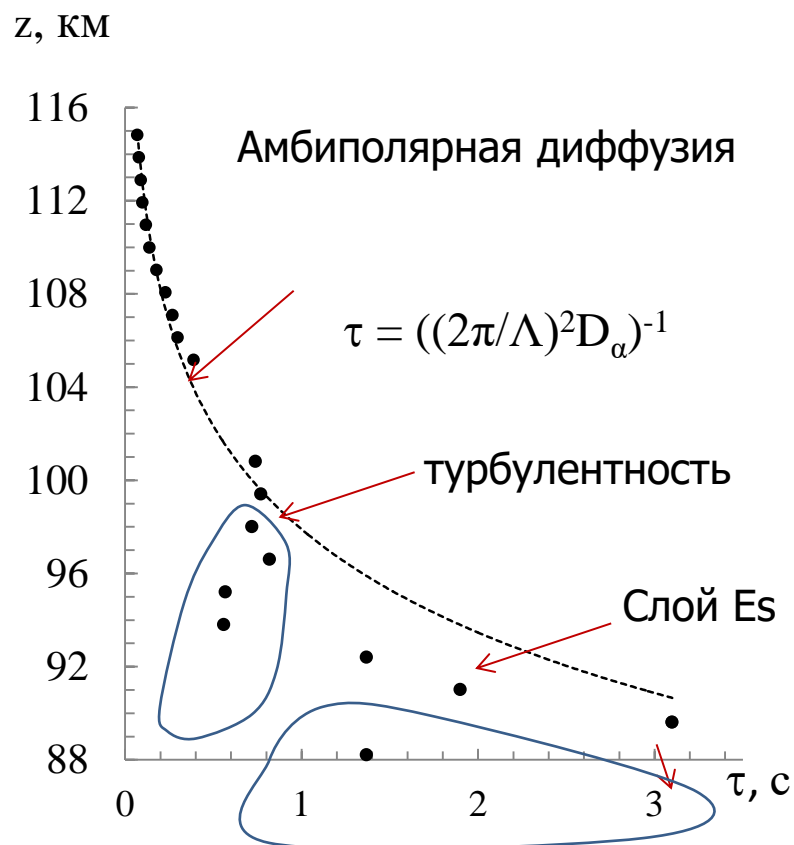
Скорость вертикального движения в D- и E-областях



Зависимость усредненных за 5 минут значений скорости вертикального движения плазмы для трех высот D-области **28.09.2018** – 66 км, 76 км и 85 км и трех высот области E – 100 км, 105 км и 112 км. Наблюдаются проявление интенсивных волновых движений разных периодов.

Релаксация ИПН в условиях турбулентности и влияние спорадического слоя E

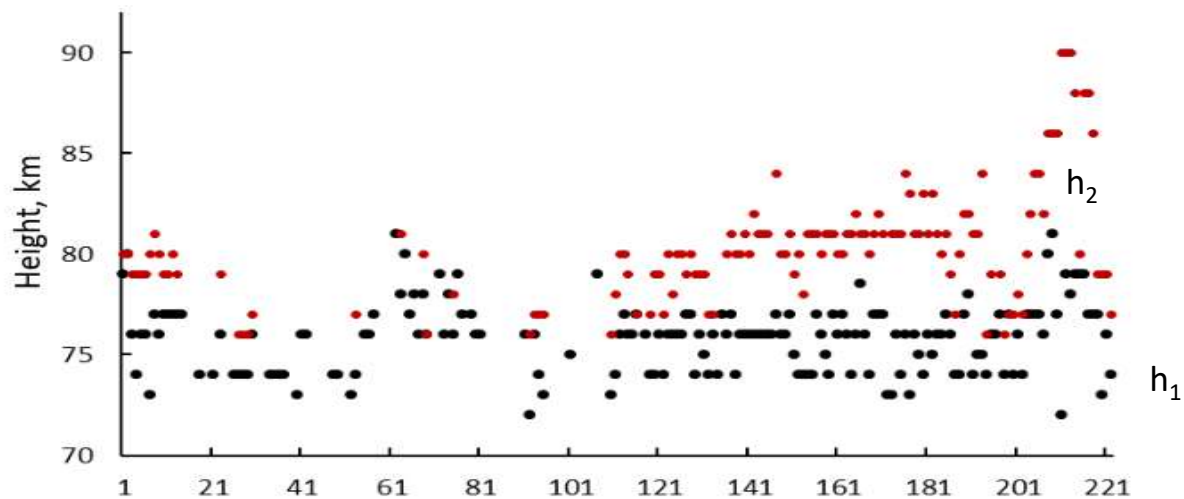
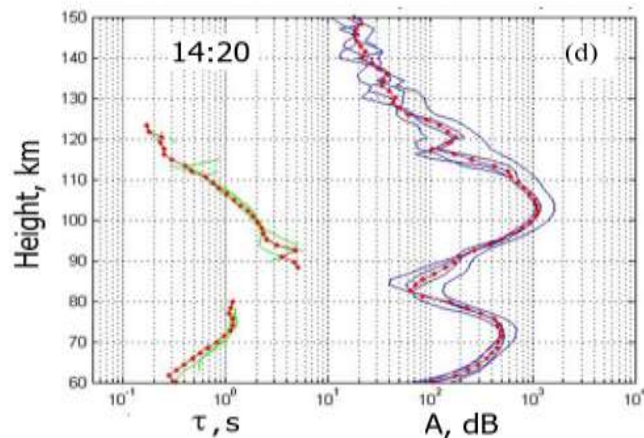
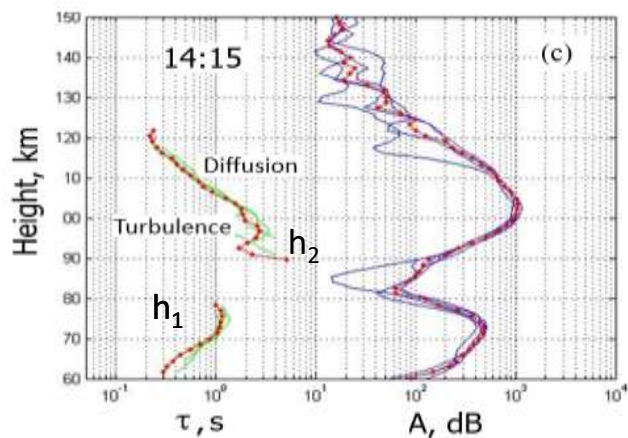
06.10.2014 сеанс 11:20



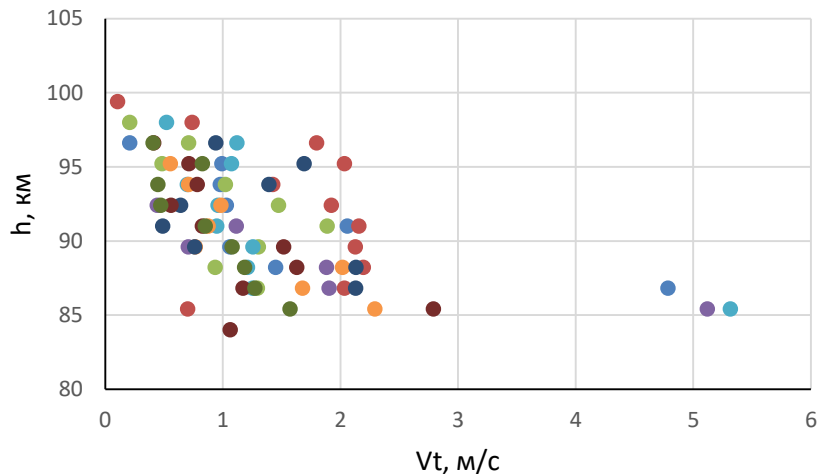
Типичный пример зависимости времени релаксации τ от высоты z . В примере выше 101 км время релаксации изменяется по диффузионному закону (почти экспоненциально) под действием амбиполярной диффузии. Здесь Λ – вертикальный масштаб ИПН, D_α коэф. амбиполярной диффузии. Ниже 101 км турбулентность разрушает ИПН и τ уменьшается. Вблизи высоты 90 км – резкий рост τ обусловленный спорадическим слоем E.

A.V. Tolmacheva, N.V. Bakhmetieva, G.I. Grigoriev, E.E. Kalinina. Advances in Space Research, 2015, vol. 56, pp. 1185-1193.

Нижняя граница области появления атомарного кислорода (h_1) 11 сентября 2019 г. по времени релаксации ИПН

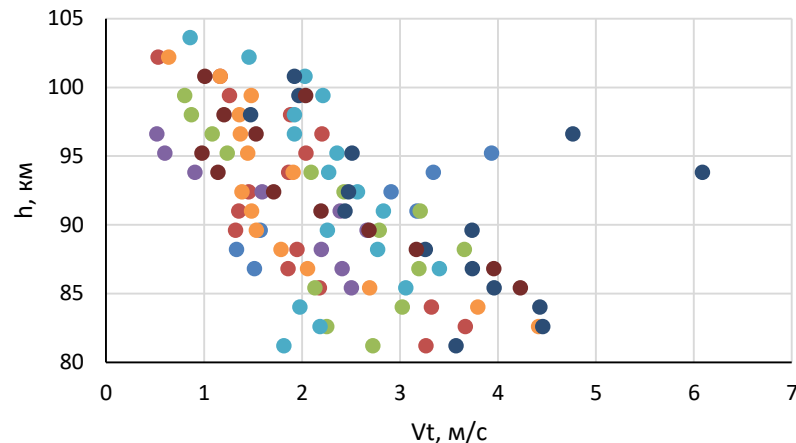


Турбулентная скорость 28.09.18



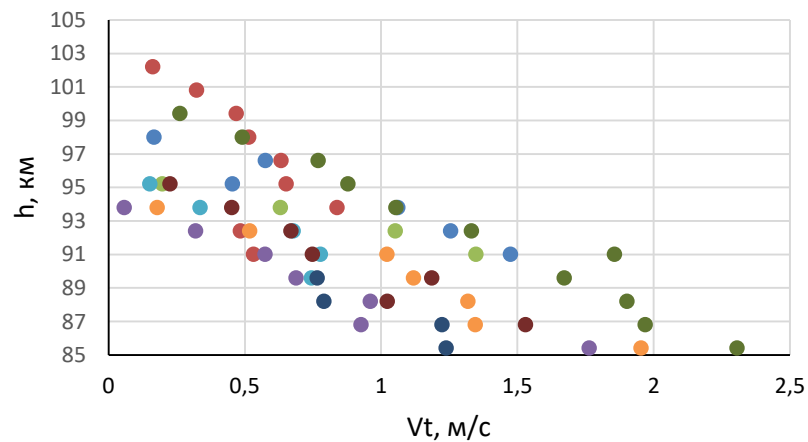
● 12:45 ● 12:55 ● 13:05 ● 13:30 ● 13:50 ● 14:10 ● 14:15 ● 15:10 ● 15:45 ●

Турбулентная скорость 28.09.17



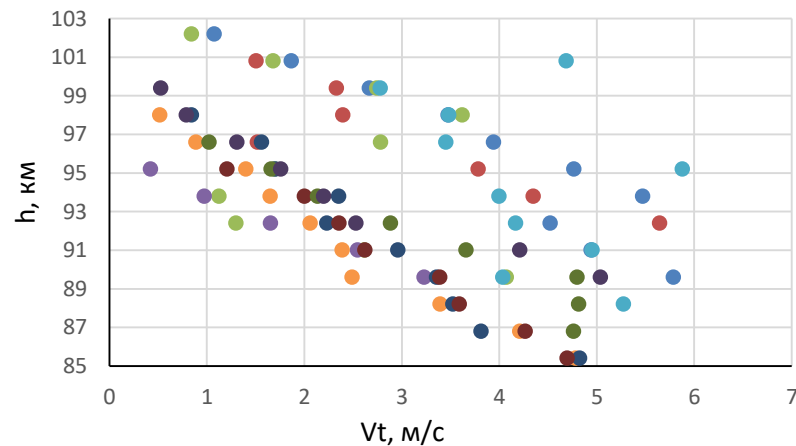
● 17:10 ● 16:40 ● 17:15 ● 17:20 ● 17:35 ● 17:40 ● 17:45 ● 17:50

Турбулентная скорость 11.09.19



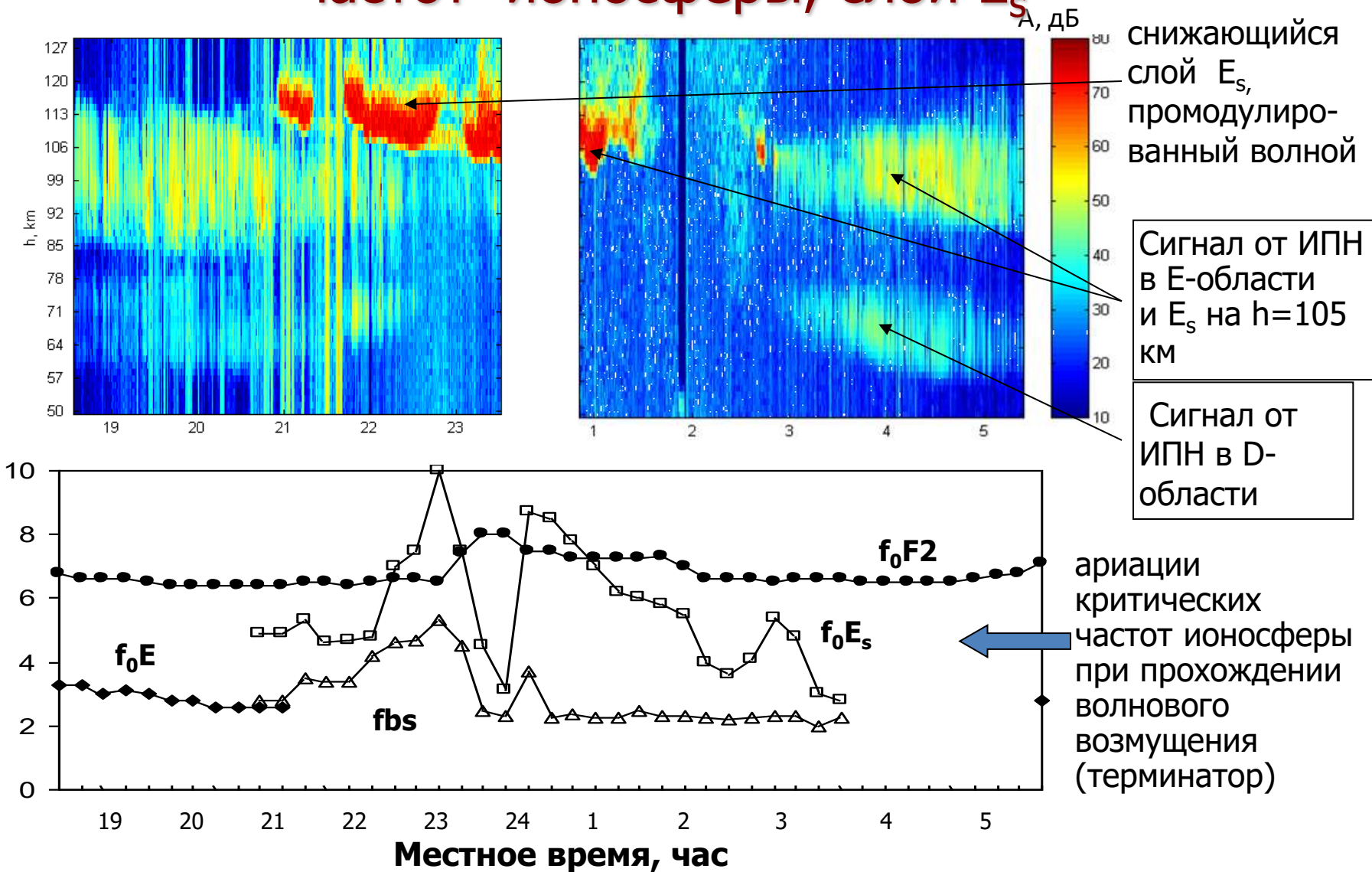
● 12:10 ● 14:10 ● 15:20 ● 16:00 ● 16:05 ● 16:10 ● 16:15 ● 16:20 ● 17:10

Турбулентная скорость 12.08.15

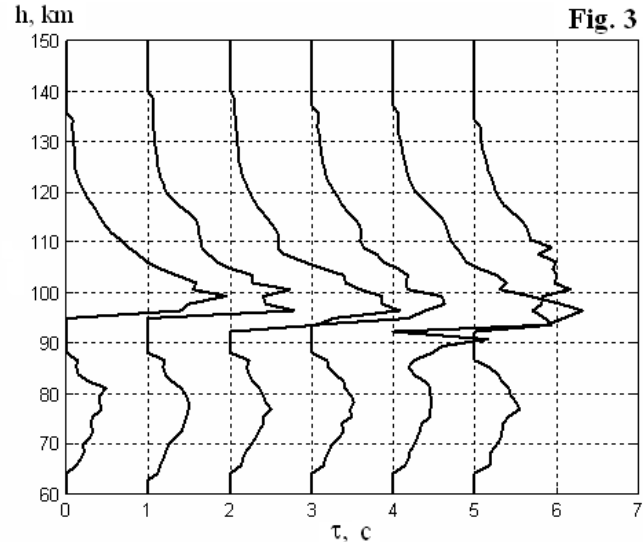
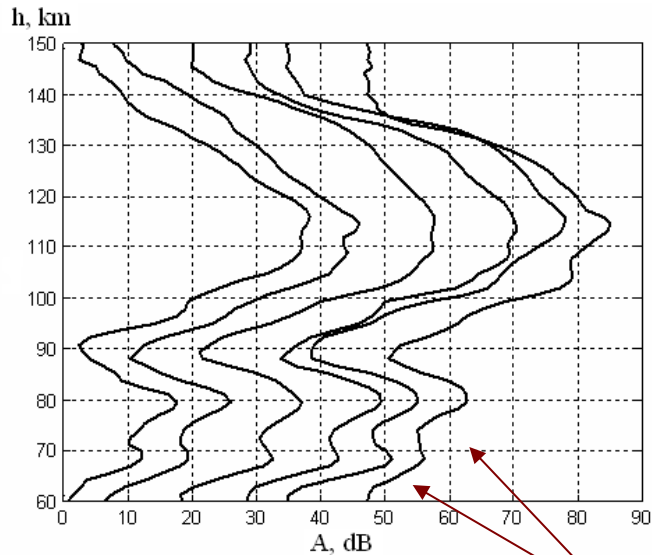


● 18:05 ● 18:10 ● 18:15 ● 18:25 ● 18:35
● 18:50 ● 18:55 ● 19:00 ● 19:05 ● 19:10

Амплитуда рассеянного сигнала на заходе и восходе Солнца 15 июня 2001 г. и вариации критических частот ионосферы, слой E_s



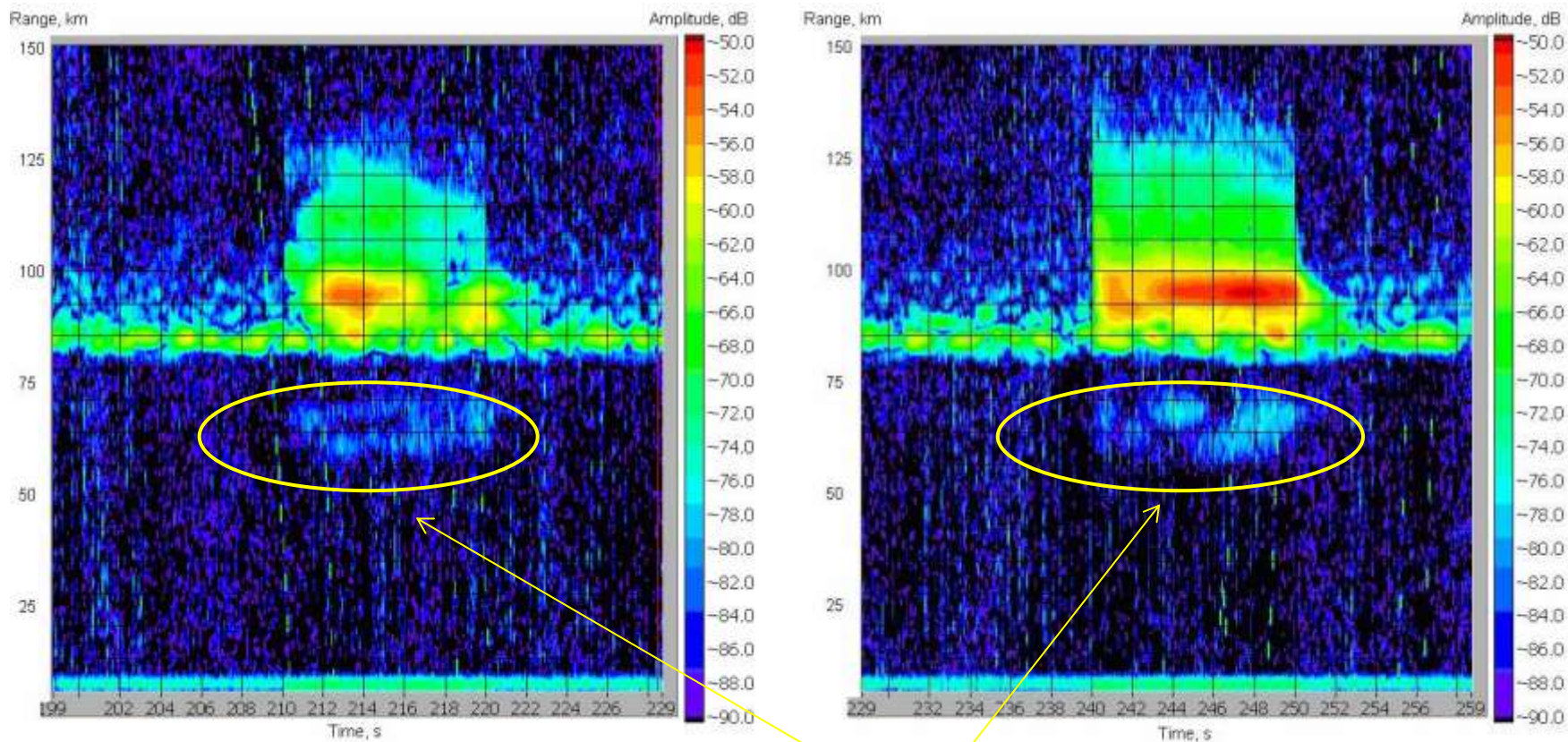
Расслоение области D – высотные профили амплитуды и времени релаксации рассеянного сигнала



Проявление расслоения D-области в амплитуде рассеянного сигнала

Последовательность усредненных за 15 минут профилей амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН. Минимум амплитуды сигнала от ИПН в двухслойной D-области обусловлен минимумом электронной концентрации. Эффект не имеет сезонного характера.

Развитие и релаксация ИПН в нижней ионосфере 05.06.2014, HAARP: нагрев 5,925 МГц, X-мода



Развитие и релаксация ИПН в E-слое и «расслоение» рассеянного сигнала в области D. Расслоение профиля амплитуды сигнала отражает расслоение профиля электронной концентрации в области D.

Что мы узнали о нижней ионосфере методом ИПН?

- Определили высотный профиль электронной концентрации в E-области, долине между E- и F-слоями, проследили за изменениями параметров долины.
- Наблюдали расслоение области D как на стенде СУРА, так и стенде HAARP.
- Научились идентифицировать слабые и «классические» спорадические слои, наблюдать за их развитием, движением и исчезновением, определять, какие преимущественно положительные ионы образуют слой E_s ; получено, что основную массу составляют ионы железа.
- Исследовали высотно-временные вариации скорости вертикального движения плазмы: проявление волновых движений разных периодов от 10-15 минут до часов, выявили влияние атмосферных волн амплитудой до 12 м/с .
- Исследовали высотно-временные вариации температуры нейтральной компоненты, выявили условия, при которых развиваются неустойчивости среды $dT/dz \approx -(17-20)$ К/км, что приводит к искажениям профиля температуры.
- Нашли, как определять высоту турбопаузы – 90-115 км , получили, что ее уровень значительно изменяется во времени, заходя иногда в область мезопаузы.
- Исследовали волны и атмосферную турбулентность на мезосферных высотах, наблюдали рост волновой активности и рост температуры выше турбопаузы при развитой турбулентности.
- Скорости турбулентных движений сопоставимы со скоростями регулярного вертикального движения.

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. – Нижний Новгород. ИПФ РАН. 1999. 155 с.
2. Bakhmet'eva N.V., Grigoriev G.I., Tolmacheva A.V., and Kalinina E.E. Atmospheric Turbulence and Internal Gravity Waves Examined by the Method of Artificial Periodic Irregularities // Russian Journal of Physical Chemistry B, 2018, Vol. 12, No. 3, pp. 510–521.
3. Bakhmetieva N.V., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E., Komrakov G.P. Earth's Lower Ionosphere during Partial Solar Eclipses According to Observations near Nizhny Novgorod // Geomagnetism and Aeronomy, 2017, Vol. 57, No. 1, pp. 58–71.
4. Бахметьева Н.В., Беликович В.В. Результаты исследований спорадического слоя E методом резонансного рассеяния радиоволн на искусственных периодических неоднородностях ионосферной плазмы // Известия вузов. Радиофизика. 2008. Т. 51. № 11. С. 956-969.
5. Nataliya V. Bakhmetieva , Gennady I. Grigoriev, Ariadna V. Tolmacheva and Ilia N. Zhemyakov. Investigations of Atmospheric Waves in the Earth Lower Ionosphere by Means of the Method of the Creation of the Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma Atmosphere, 2019, 10, 450; doi:10.3390/atmos10080450.
6. Bakhmetieva N.V., Grach S.M., Sergeev E.N., Shindin A.V., Milikh G.M., Siefring C.L., Bernhardt P.A., McCarrick M. Artificial periodic irregularities in the high-latitude ionosphere excited by the HAARP facility // Radio Sci., 51, 999–1009, doi:10.1002/2015RS005938.
7. Andrianov A.F., Bakhmet'eva N.V., Vyakhirev V.D., Kalinina E.E., Krasilnikov A.A., Kulikov Yu.Yu. A study of the density variations of mesospheric ozone in the case of ionospheric perturbation by the “Sura” facility radiation with simultaneous diagnostics of ionospheric plasma // Radiophysics and Quantum Electronics, 2019. Vol. 62, No. 5, p.326 – 341.
8. Bakhmetieva N.V., Yusupov K.M. Artificial periodic irregularities and investigations of sporadic E-layers // 2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference, AP-RASC 2019 8738472, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8738472>.
9. Nataliya V. Bakhmetieva, Yuri Yu. Kulikov and Ilia N. Zhemyakov. Mesosphere Ozone and the Lower Ionosphere under Plasma Disturbance by Powerful High-Frequency Radio Emission // Atmosphere 2020, 11, 1154; doi:10.3390/atmos11111154
10. Nataliya V. Bakhmetieva, Gennady I. Grigoriev, Ariadna V. Tolmacheva and Ilia N. Zhemyakov. Investigations of Atmospheric Waves in the Earth Lower Ionosphere by Means of the Method of the Creation of the Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere 2019, 10, 450; doi:10.3390/atmos10080450

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

