



Двадцать вторая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА» ИКИ РАН 11 - 15 ноября 2024 г.



Рассеяние радиоволн естественными и искусственными неоднородностями D-области ионосферы

Н.В. Бахметьева, Г.И. Григорьев, Е.Е. Калинина,
И.Н. Жемяков, А.А. Лисов

Работа выполнена в рамках проекта № FSWR-2023-0038 по
базовой части государственного задания Министерства
образования и науки Российской Федерации.

Эта загадочная область D (А.Д. Данилов)

- Высоты 50–90 км, недоступные ионозонду.
- Низкая электронная концентрация: $N_e < 10^4 \text{ см}^{-3}$.
- Сложная фотохимия, сложный ионный состав.
- Положительные ионы-связки (кластерные ионы): $H^+(H_2O)_n$, при $n=1-7$, $NO^+(H_2O)$, $NO^+(CO_2)$, $NO^+(N_2)$ и др.
- Отрицательные ионы : O_2^- , Cl^- , $H_3O_2^-$, CO_3^- , HCO_3^- , NO_3^- и др. существуют только в области D
- Неоднородная структура, наблюдаемое расслоение регулярной D-области.
- Интенсивная динамика, горизонтальный и вертикальный ветер.
- Атмосферная турбулентность.
- Внутренние гравитационные волны.
- Высотные молниевые разряды на высотах 50–100 км – спрайты, эльфы, синие джетты.
- Мезосферные явления – пылевая плазма, летние мезосферные эхо на высотах 80-89 км.
- Мезопауза – минимум температуры нейтральной атмосферы.

Методы исследования D-области, развиваемые в НИРФИ ННГУ, г. Нижний Новгород

Рассеяние пробных радиоволн естественными неоднородностями электронной концентрации D-области – метод частичных отражений (МЧО).

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Лернер А.М. Эмпирическая модель распределения электронной концентрации среднеширотной D-области ионосферы // Геомagnetизм и аэрономия. 1992, Т. 32, № 6, с. 95–103.
2. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е. Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений на средних широтах и в авроральной зоне // Известия вузов. Радиофизика. 2003. Т. 46, № 3. С. 181–191.

Рассеяние радиоволн искусственными периодическими неоднородностями ионосферной плазмы – метод резонансного рассеяния пробных радиоволн на ИПН.

1. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью ИПН – Н. Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.
2. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Особенности нижней ионосферы Земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ИПН вблизи Нижнего Новгорода // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10. № 3. С. 129–145.

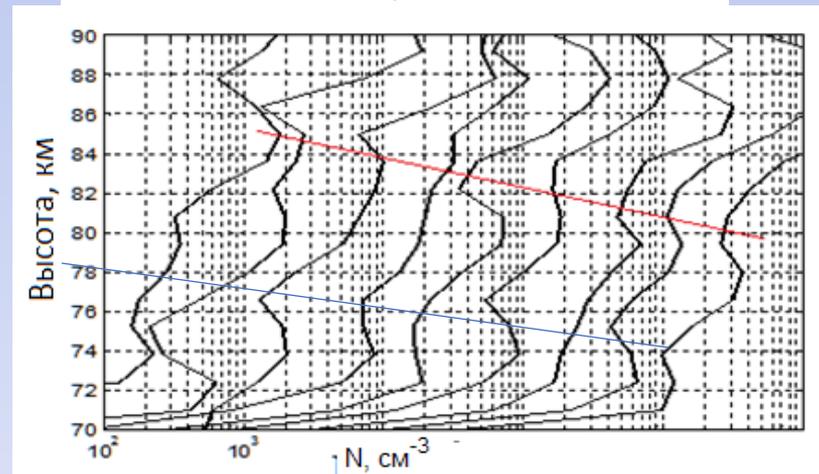
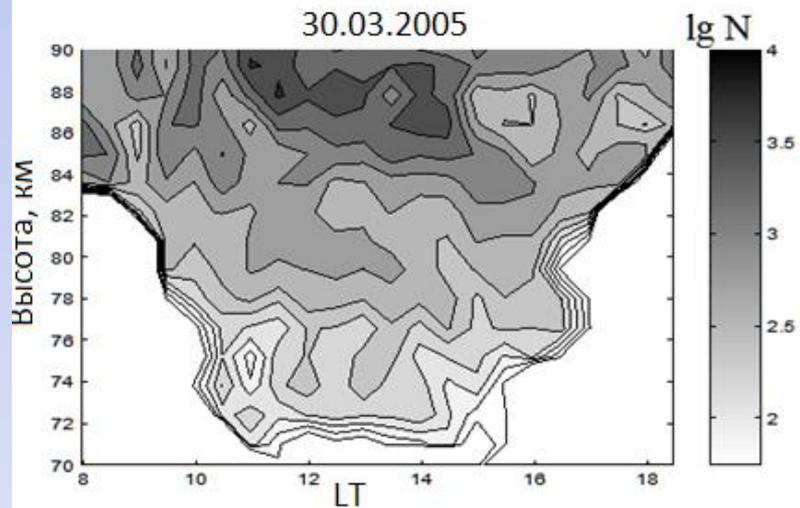
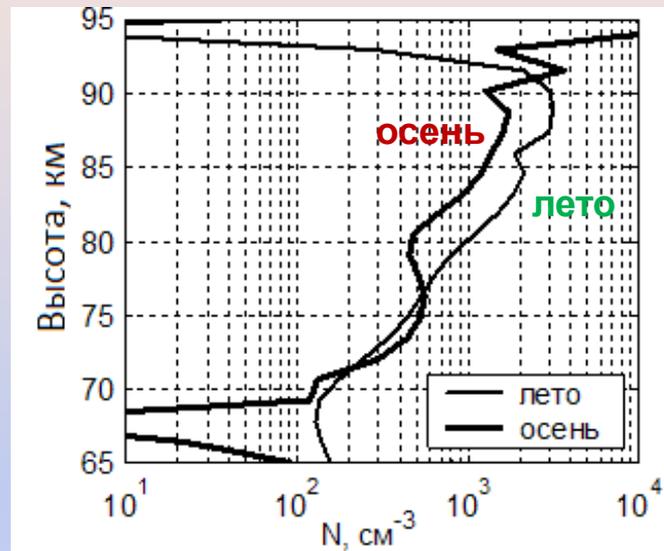
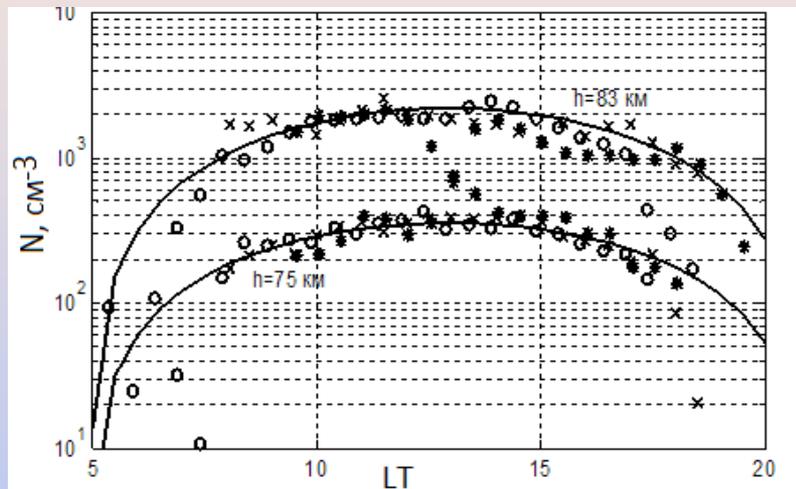
Основные задачи исследований D-области в НИРФИ

- Измерение высотного профиля электронной концентрации.
- Измерение скоростей вертикальных и горизонтальных движений среды.
- Отклик нижней ионосферы на солнечное затмение.
- Реакция D-области на хромосферные вспышки.
- Закон рекомбинации, линейная рекомбинация в области D. Возможность рекомбинации на пылевых частицах.
- Концентрация атомарного кислорода и нижняя граница его появления.
- Заходно-восходная асимметрия области D в амплитуде сигнала, рассеянного ИПН.
- Динамика нижней ионосферы: турбулентность и атмосферные волны.
- Нагревные явления в D-области при возмущении ионосферы мощным КВ радиоизлучением.

Сезонно-суточные вариации N(h)-профиля

$$N \sim \cos \chi$$

июнь и сентябрь, 2002 год



Каждый профиль получен усреднением за 30 минут. Локальные минимумы N(h) на высотах 80–84 км (устойчивый) и 74–78 км (эпизодически).

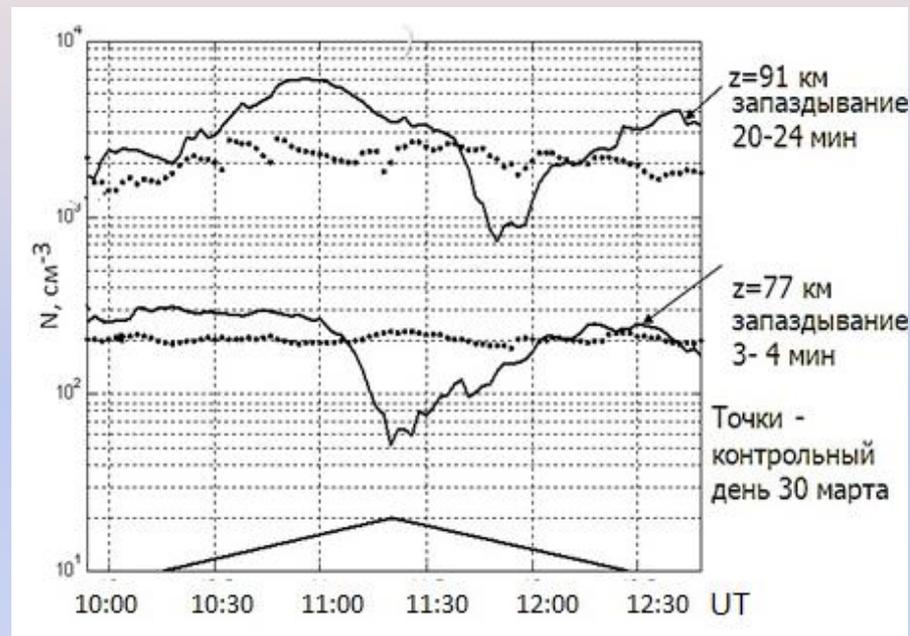
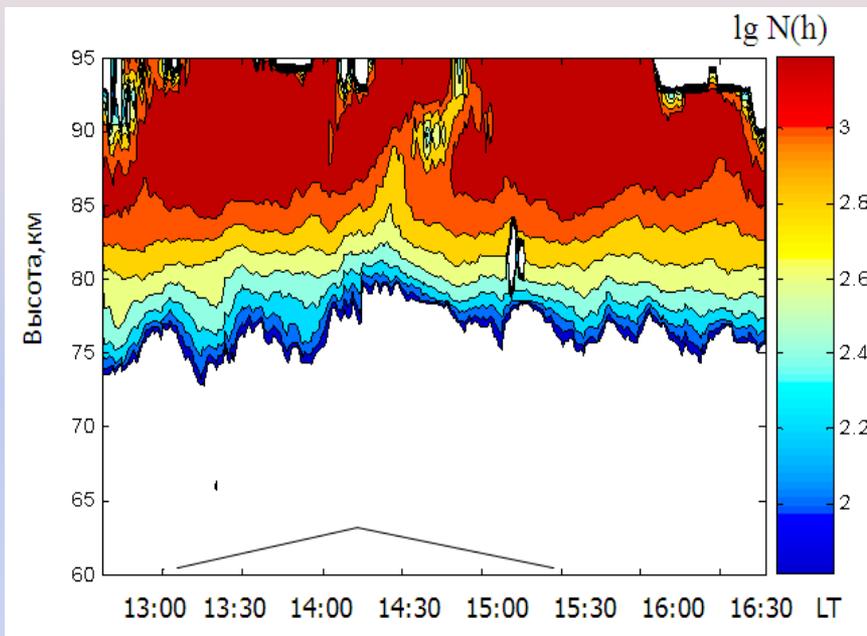
Высотный профиль электронной концентрации – результаты (МЧО)

1. Создана эмпирическая модель D –области по результатам более, чем 2000 N(h)-профилей .
2. Установлено, что зависимость электронной концентрации от времени N(t) на средних широтах на высотах 70–90 км в течение дня изменяется в соответствии с изменением зенитного угла Солнца: $N(t) \sim \cos \chi^k$ с показателем степени $k \approx 1$ что существенно выше значений, найденных ранее ($k \sim 0,5$).
3. Показано, что наблюдается значительное сезонное различие в N(h)-профилях: в летнем профиле – экспоненциальный рост с высотой, в осеннем – устойчивый минимум на высоте 84–80 км. Выше этого минимума электронная концентрация в сентябре меньше летней примерно в отношении косинусов зенитного угла (отношение косинусов равно 0,62), а на высотах 71–76 км значения N в сентябре выше летних примерно в 1,2 раза.
4. Одновременные измерения в Васильсурске (НИРФИ) и Туманном (ПГИ) показали, что на высотах 70–80 км электронная концентрация в Туманном была в 4 раза выше. **Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений весной 2004 г. на средних и высоких широтах // Геомагнетизм и аэрономия. 2006. Т. 46, № 2. С. 229–233.**

Солнечные затмения и электронная концентрация в D-области (МЧО)

01.08.2008, фаза 0.653

29.03.2006, фаза 0.696



1. Уменьшение электронной концентрации во время затмения.
2. Разное время отклика (минимума) N относительно максимальной фазы затмения: на высоте 77 км отклик составил 3–4 минуты, на высоте 91 км отклик 20–24 минуты .
3. Показано, что на этой основе можно сделать вывод о разном законе рекомбинации для нижней и верхней части D-области.

Отклик D-области на затмения Солнца - результаты (МЧО)

1. Во время затмений 26.03.2006 (фаза 0.696) и 01.08.2008 (фаза 0.653) электронная концентрация уменьшалась в 4–5 раз и в 3–4 раза.
 2. Временной отклик D-области на затмение – достижение минимума концентрации $N(t)$ – разный на разных высотах: для $h=85–91$ км запаздывание $\tau \approx 20–24$ минуты (квадратичный закон рекомбинации), для $h=75–77$ км запаздывание $\tau \approx 2–4$ минуты (линейный закон рекомбинации).
 3. Сделаны оценки для $h=90$ км в предположении $\partial N/\partial t = q - \alpha \cdot N^2$, время запаздывания отклика $\tau = 1/\alpha N$; при $\alpha = 3 \cdot 10^{-7} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$ $\tau \approx 27$ мин.
- Для высоты $h=77$ км $\partial N/\partial t = q - \psi \cdot N$, где $\psi \approx 3 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ – эффективный коэффициент потерь и время запаздывания отклика $\tau \approx 3$ мин.

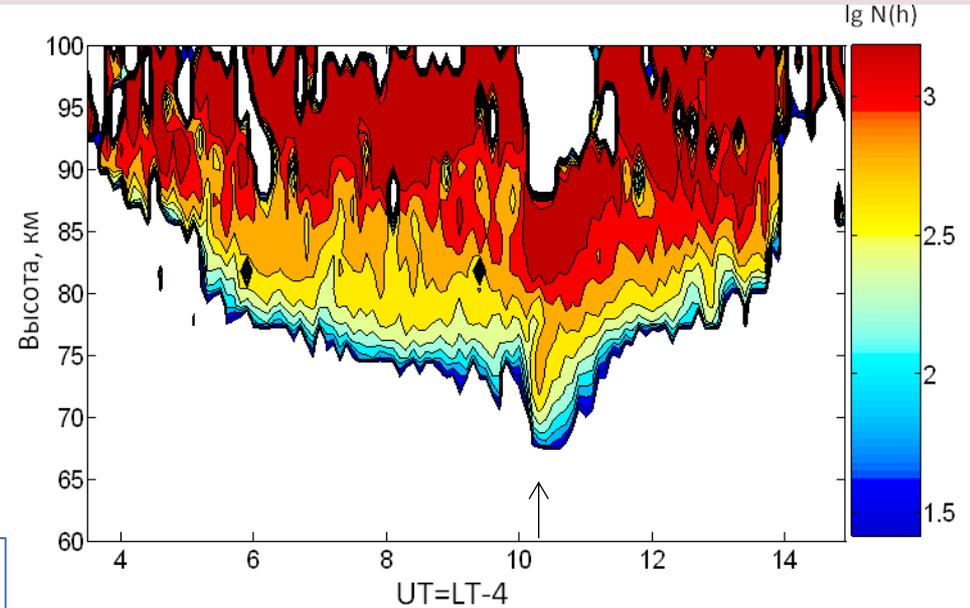
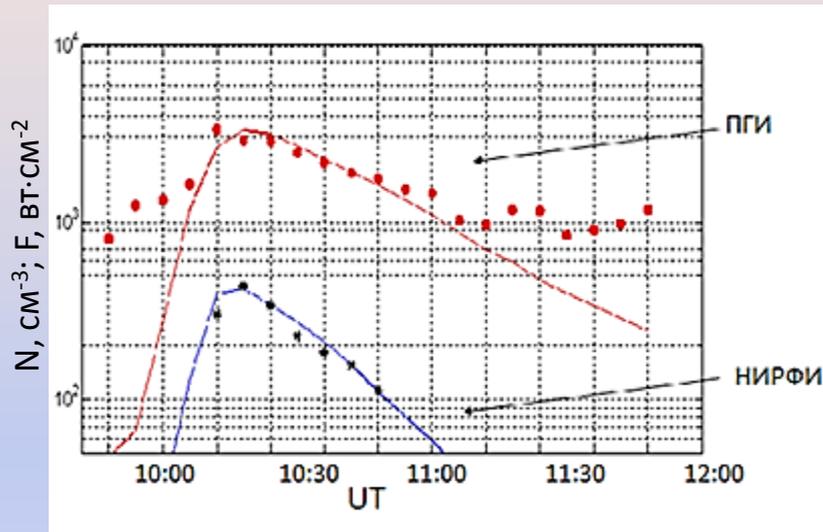
Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений на средних широтах и в авроральной зоне // *Изв. вузов. Радиофизика*. 2003. Т. 46, № 3. С. 181–191.

Беликович В. В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Черняков С.М., Терещенко В.А. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29 марта 2006 г. по наблюдениям в Нижнем Новгороде и Мурманске. *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2008. Т. 48, № 1. С. 103–108.

Реакция D-области на хромосферные вспышки

Поток рентгеновского излучения F во время вспышки 08.04.2004 и N на высоте 71 км

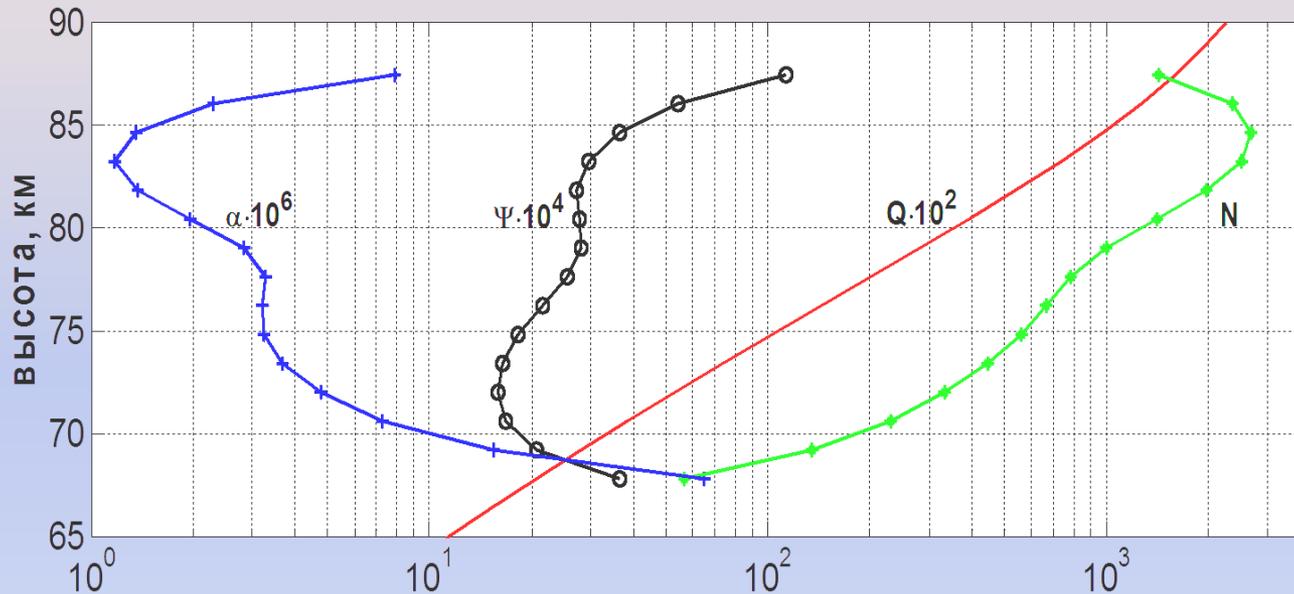
Электронная концентрация во время вспышки 08.04.2004



Электронная концентрация (точки) пропорциональна потоку рентгеновского излучения F (линия), а не квадратному корню из потока.

По измерениям электронной концентрации методом частичных отражений во время вспышек на Солнце и потоков рентгеновского излучения на спутниках найдены функции ионообразования и коэффициента потерь электронов. Расчеты проведены для солнечных вспышек 04.04.2008, 06.04.2008 и 08.04.2008. Полученные результаты свидетельствуют о преобладании линейного закона рекомбинации, который может быть обусловлен рекомбинацией плазмы на пылевых частицах размером 10^{-5} см при концентрации пыли $30 - 100 \text{ см}^{-3}$.

Электронная концентрация, функция ионообразования θ , коэффициент потерь Ψ и эффективный коэффициент рекомбинации α во время вспышки 08.04.2004 в 10:30 UT



В.В. Беликович, М.В. Беликович. Рекомбинация в D-области ионосферы // Доклады XII Всероссийской конференции по распространению радиоволн, 22 – 26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону – п. Лоо. Труды конференции. Т. 1. С. 209–212.

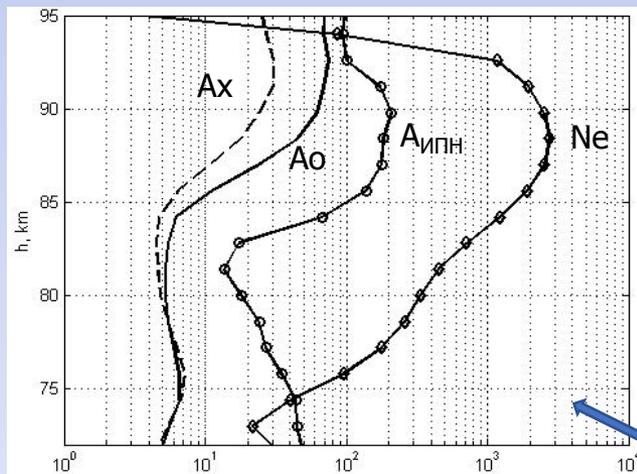
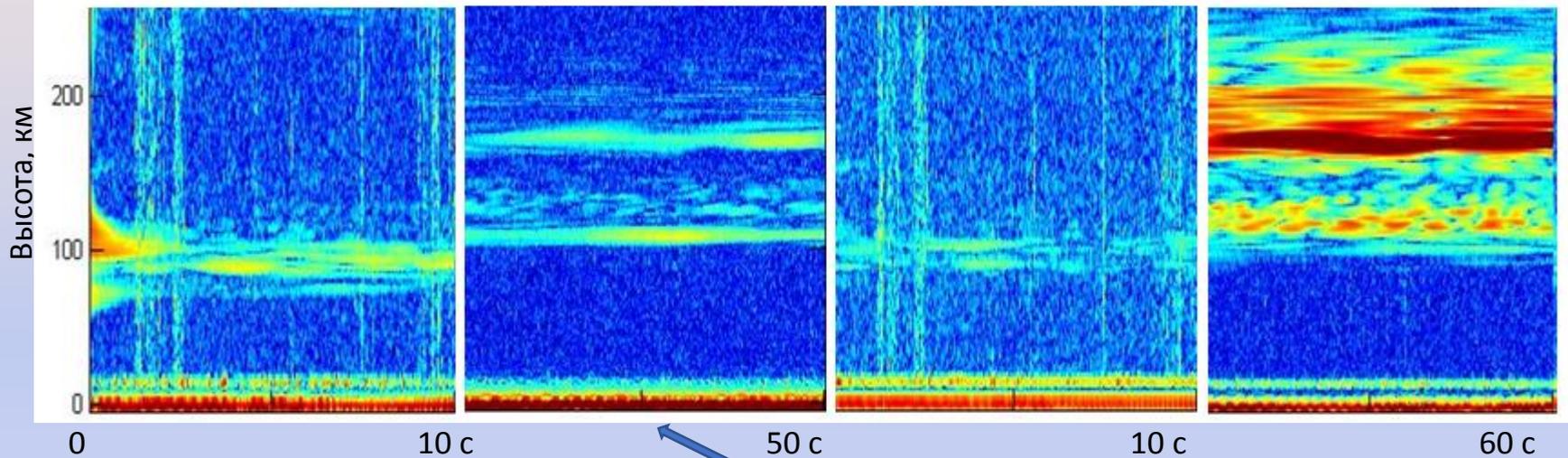
Комплексная диагностика D-области методом частичных отражений и методом обратного рассеяния на ИПН

ИПН 4,7 МГц; X-мода

МЧО 2,95 МГц; X-мода

ИПН 4,7 МГц; O-мода

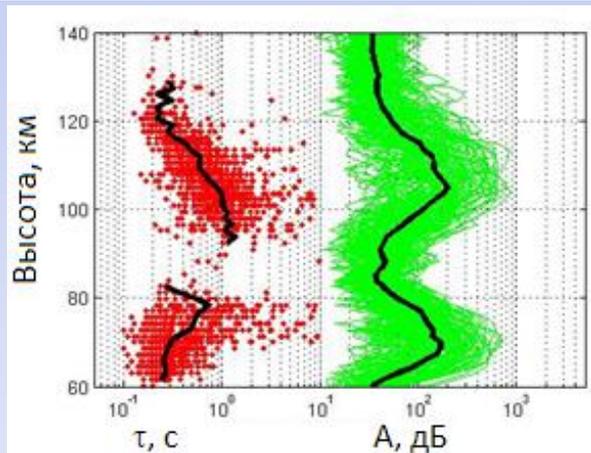
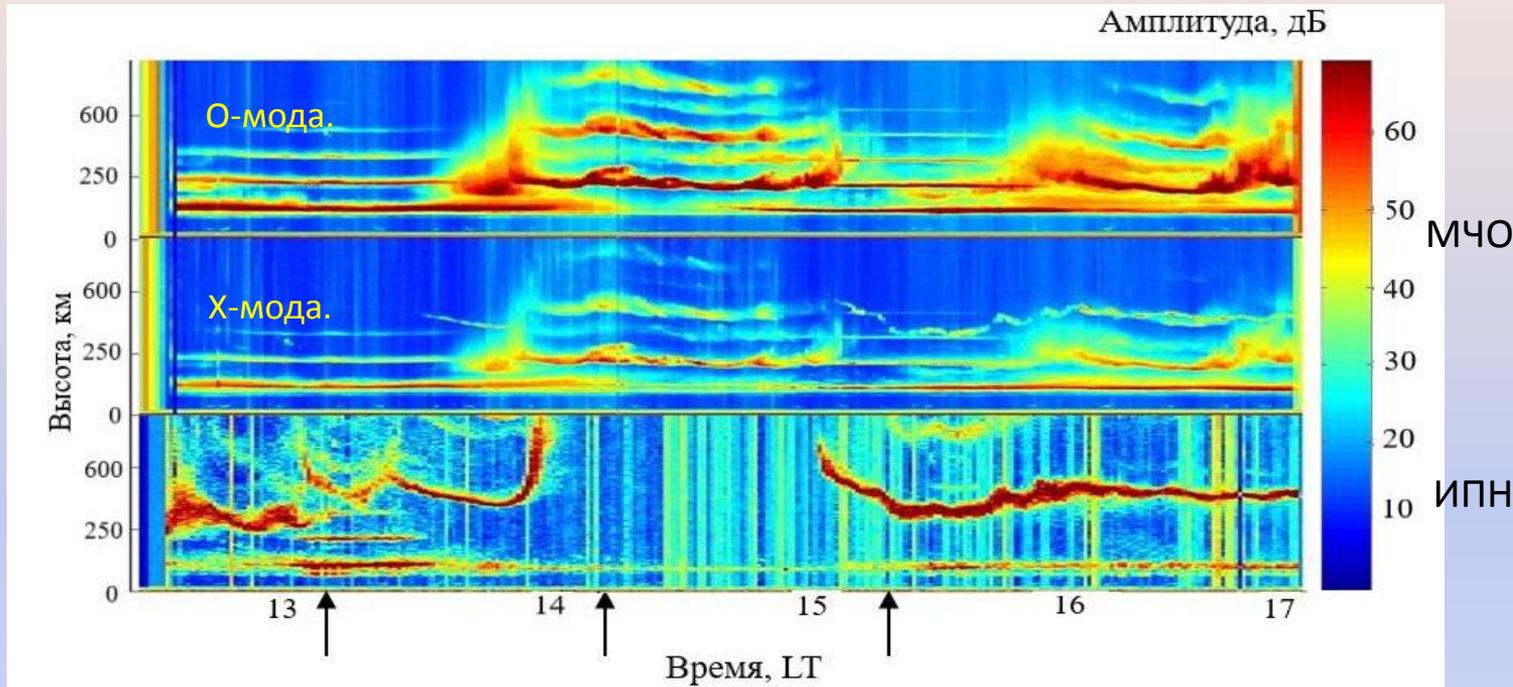
МЧО 2,95 МГц; O-мода



Комплексные измерения: МЧО ($f=2,95$ МГц) + ИПН ($f=4,7$ МГц) - впервые одновременные измерения двумя методами проведены в июле 2008 г. Регистрация рассеянных сигналов в течение 1 минуты = 10 секунд (ИПН) + 50 секунд (МЧО). Яркая запись амплитуд сигналов, рассеянных естественными и искусственными неоднородностями.

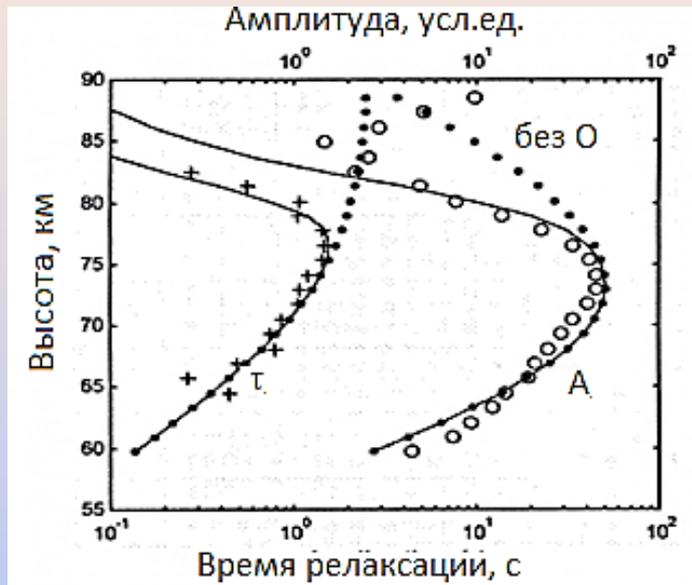
Высотные профили амплитуд необыкновенной A_x и обыкновенной A_o компонент пробной волны, $A_{\text{ИПН}}$ в усл.ед. и N в см^{-3} 02.08.2008 в 13:45 МСК

Отклик D-области на солнечное затмение 01.08.2008. Совместные измерения методами МЧО и ИПН, $\phi = 0,653$

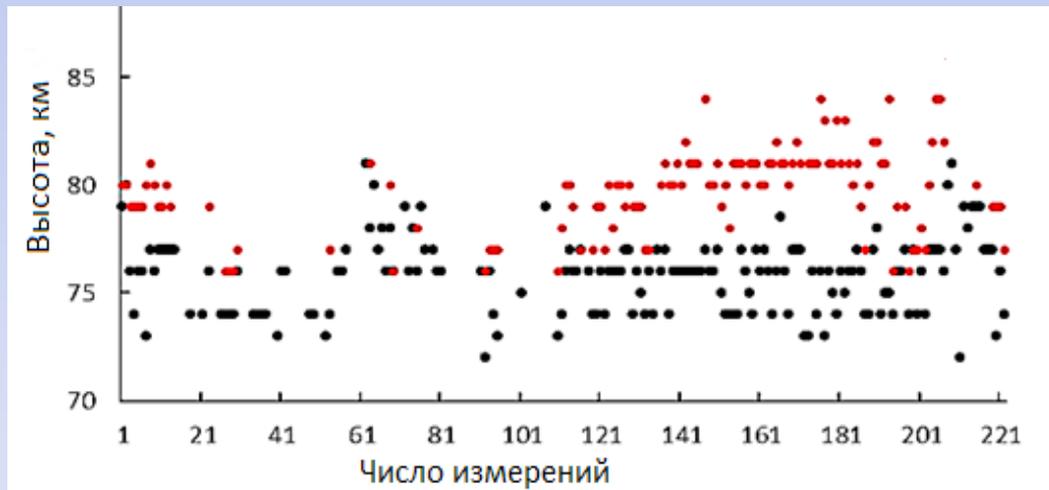


Пример высотных профилей времени релаксации (левая кривая) и амплитуды рассеянного сигнала (правая кривая) для 20.03.2015 в 11:45, усреднённых по 30-ти минутным сеансам (каждый минутный профиль показан красными точками и зелеными линиями). Выше 82 км ИПН пропадают из-за влияния атомарного кислорода, рост его концентрации увеличивает скорость отлипания электронов от отрицательных ионов. При этом условия образования ИПН ухудшаются вплоть до полного прекращения.

Атомарный кислород в D-области



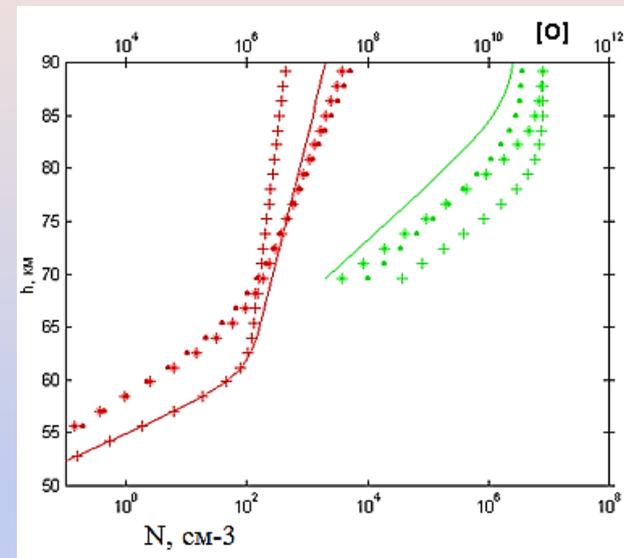
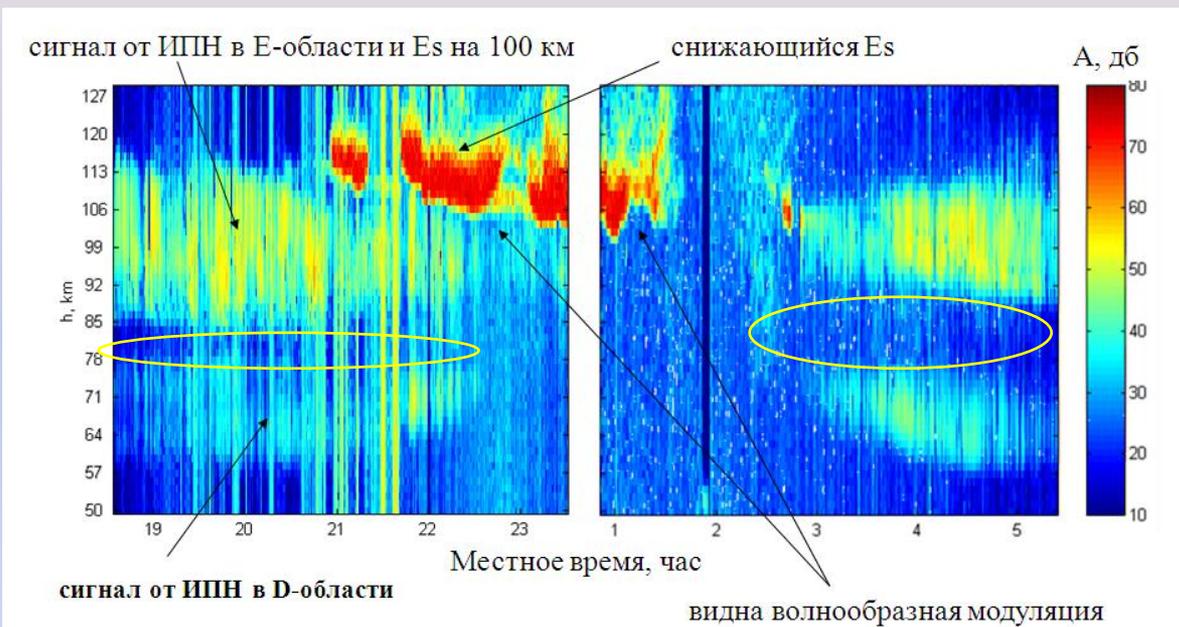
Моделирование высотных зависимостей амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН, с учетом и без учета атомарного кислорода. Измеренные профили времени релаксации крестики (нижняя шкала) и амплитуды (кружки, верхняя шкала) сигнала, рассеянного ИПН, в сравнении с модельными расчетами (кривые) с учетом влияния атомарного кислорода для 09.08.1996. Теоретические и экспериментальные профили хорошо соответствуют друг другу. Точками обозначены расчеты по модели без учета атомарного кислорода, видно их большое отличие от экспериментальных кривых выше 75-77 км.



Определение нижней границы появления атомарного кислорода (черные точки) по его влиянию на образование ИПН в D-области и уменьшению амплитуды сигнала, рассеянного ИПН. Красные точки — высоты, на которых рассеянный сигнал пропал совсем.

Заходно-восходная асимметрия в амплитуде сигнала, рассеянного ИПН

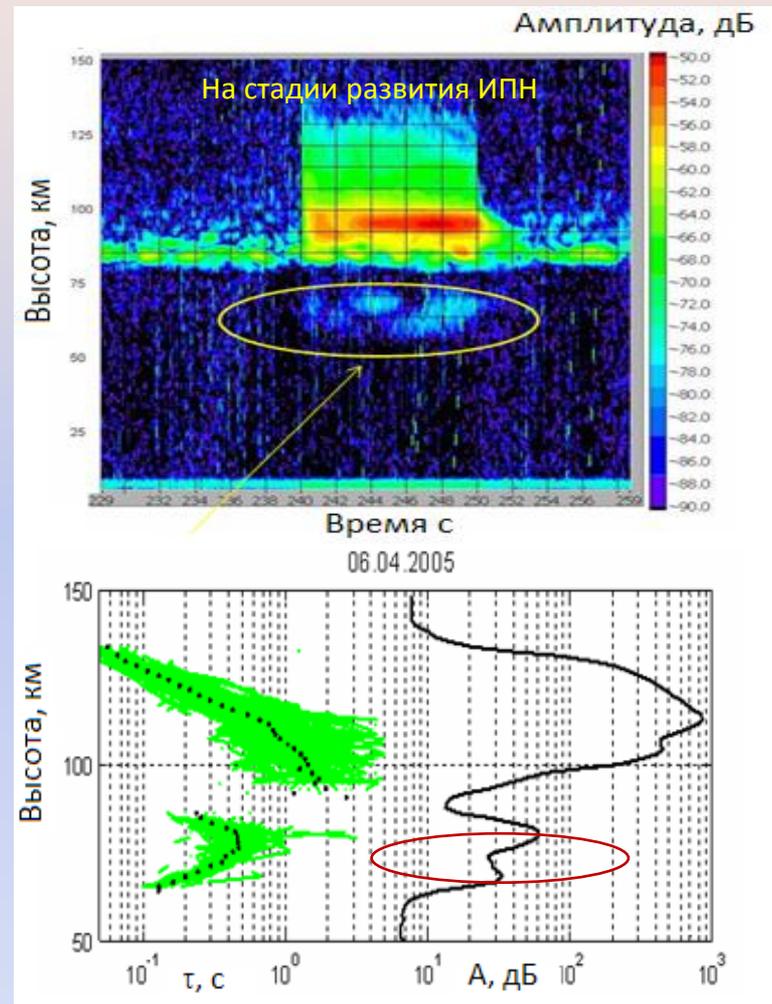
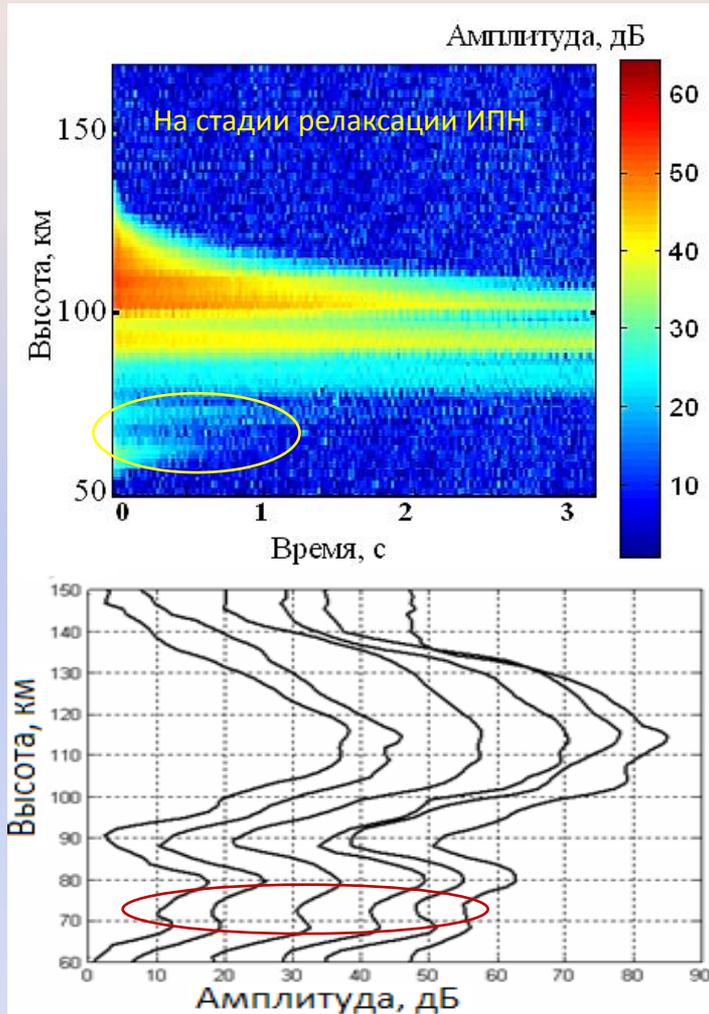
Высотно-временная зависимость амплитуды рассеянного сигнала в заходно-восходные часы 15-16 июня 2001 г.



Высотные профили электронной концентрации N и атомарного кислорода [O]. Сплошные линии и точки - заход, звездочки и крестики - восход. Сплошные линии и крестики при $\chi=89^\circ$, точки и звездочки $\chi=94^\circ$.

Значительное увеличение "провала" между D и E слоями на восходе (овалы). Рост концентрации атомарного кислорода в интервале высот 70-80 км, где он существенно влияет на время релаксации ИПН. Модельные $N(h)$ -профили: быстрое убыванием ниже 60 км и медленный рост выше этой высоты при $\chi=89^\circ$. При $\chi=94$ профиль поднимается на 5-6 км. На профилях [O](h) видно возрастание его концентрации на восходе в 2-3 раза и понижение его нижней границы на 5-7 км.

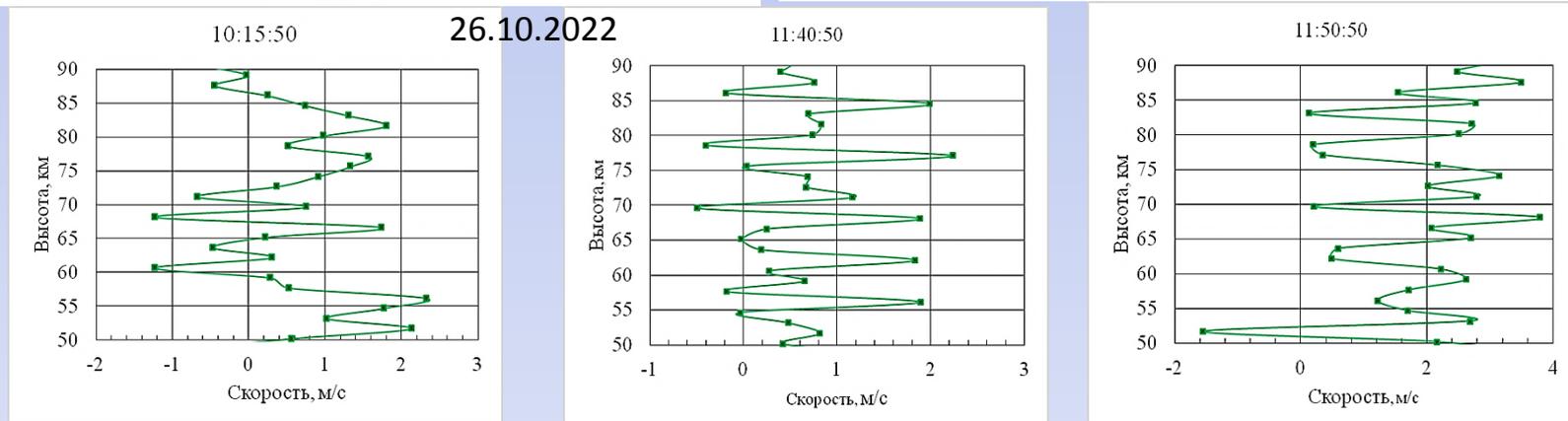
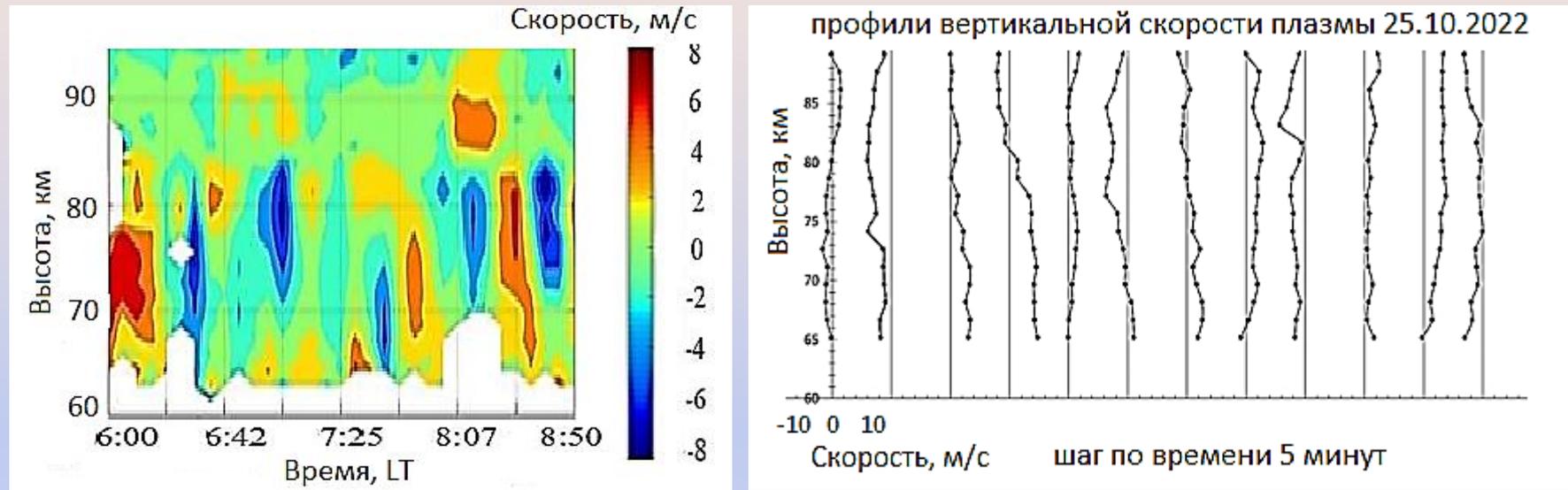
Расслоение высотного профиля амплитуды рассеянного сигнала (ИПН)



Минимум амплитуды сигнала от ИПН обусловлен минимумом электронной концентрации и не зависит от сезона. Наблюдался в средних (стенд СУРА) и высоких (стенд НААРР) широтах. Вывод: область D часто бывает двухслойной, имеет локальный минимум электронной концентрации.

Скорость вертикального движения плазмы (ИПН)

13.08.2015, восход Солнца



Отрицательные значения скорости $V < 0$ – это движение вверх. В области D имеют место значительные и быстрые вариации скорости по величине и направлению, по высоте и во времени. Интенсивная динамика обусловлена атмосферными волнами и естественной турбулентностью.

Выводы

- Создана эмпирическая модель D –области по результатам измерений методом частичных отражений более, чем 2000 N(h)- профилей. Исследованы сезонно-суточные вариации электронной концентрации.
- Методом частичных отражений наблюдадось разное время отклика электронной концентрации (ее минимума) относительно максимальной фазы затмения: высота 77 км – 3-4 минуты, высота 91 км – 20-24 минуты. Сделан вывод о разном законе рекомбинации для нижней и верхней части D-области (линейный и квадратичный).
- По измерениям электронной концентрации потоков рентгеновского излучения на спутниках во время вспышек на Солнце найдены функции ионообразования и коэффициента потерь электронов. Показано, что возможно преобладание линейного закона рекомбинации, который может быть обусловлен рекомбинацией плазмы на пылевых частицах размером 10^{-5} см при концентрации пыли 30-100 см⁻³.
- На вариации N(h)-профиля влияют динамические явления, связанные с внутренними гравитационными волнами, турбулентными образованиями и другими атмосферными явлениями. Методом ИПН получены значительные быстрые вариации скорости по величине и направлению, по высоте и во времени.
- Высотные профили амплитуды и времени релаксации сигнала, рассеянного ИПН, объяснены на основе модели аэрономических процессов с одним отрицательным ионом кислорода. На нижних высотах D-области профили чувствительны к плотности атмосферы и концентрации кислорода в состоянии 1Δg, а на больших – к концентрации атомарного кислорода.
- Значительное увеличение "провала" между D- и E-областями на восходе объясняется возрастанием концентрации атомарного кислорода на восходе в 2–3 раза и понижением его нижней границы на 5–7 км.
- Расслоение области D методом ИПН наблюдалось в разные годы и сезоны года года, в весенние месяцы, летом и осенью, во время затмений Солнца и в заходно-восходный период.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений весной 2004 г. на средних и высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. - 2006. -Т. 46, № 2. -С. 229-233.
2. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Черняков С.М., Терещенко В.А. Отклик ионосферы на частное солнечное затмение 29.03.2006 по наблюдениям в Н. Новгороде и Мурманске // Геомагнетизм и аэрномия. 2008. Т. 48, № 1. С. 103-108.
3. Беликович В.В., Вяхирев В.Д., Калинина Е.Е., Терещенко В.Д., Оглоблина О.Ф., Терещенко В.А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений весной 2004 г. на средних и высоких широтах // Геомагнетизм и аэрномия. - 2006. Т. 46, № 2. С. 229-233.
4. Беликович В.В., Беликович М.В. Рекомбинация в D-области ионосферы // Доклады XXII Всероссийской конференции по распространению радиоволн, 22 – 26 сентября 2008 г., Ростов-на-Дону – п. Лоо. Труды конференции. Т. 1. С. 209–212.
5. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Вяхирев В.Д., Лернер А.М. Эмпирическая модель распределения электронной концентрации среднеширотной D-области ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1992, Т. 32, № 6, с. 95–103.
6. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Жемяков И.Н., Калинина Е.Е., Лисов А.А. Особенности нижней ионосферы Земли во время затмений Солнца и в заходно-восходные часы по измерениям методом ИПН вблизи Нижнего Новгорода // Солнечно-земная физика. 2024. Т. 10. № 3. С. 129–145.
7. Nataliya V. Bakhmetieva and Gennadiy I. Grigoriev. Study of the Mesosphere and Lower Thermosphere by the Method of Creating Artificial Periodic Irregularities of the Ionospheric Plasma // Atmosphere, 2022, 13, 1346.
<https://doi.org/10.3390/atmos13091346>
8. Беликович В.В., Бенедиктов Е.А., Толмачева А.В., Бахметьева Н.В. Исследование ионосферы с помощью искусственных периодических неоднородностей. - Нижний Новгород: ИПФ РАН. 1999. 156 с.
9. Belikovich, V.V.; Benediktov, E.A.; Tolmacheva, A.V.; Bakhmet'eva, N.V. *Ionospheric Research by Means of Artificial Periodic Irregularities*; Copernicus GmbH: Katlenburg-Lindau, Germany, 2002; p. 160.
10. Бахметьева Н.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. Искусственные периодические неоднородности, гидродинамические неустойчивости и динамические процессы в мезосфере-нижней термосфере // Изв. вузов. Радиофизика. 2010. Т. 53. N 11. С. 695-711.
11. Бахметьева Н.В., Жемяков И.Н. Вертикальные движения плазмы в динамике мезосферы и нижней термосферы Земли // Химическая физика, 2022, т.41, №10, с.65-83.
12. Bakhmetieva, N.V.; Grigoriev, G.I.; Vinogradov, G.R.; Zhemyakov, I.N.; Kalinina, E.E.; Pershin, A.V. Parameters of Atmospheric Turbulence and the Dynamics of the Lower Ionosphere in Studies at the SURA Facility. *Geomag. Aeron.* **2021**, *61*, 871–887.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

