



Двадцатая международная конференция «СОВРЕМЕННЫЕ
ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ
ИЗ КОСМОСА» ИКИ РАН 14 - 18 ноября 2022 г.

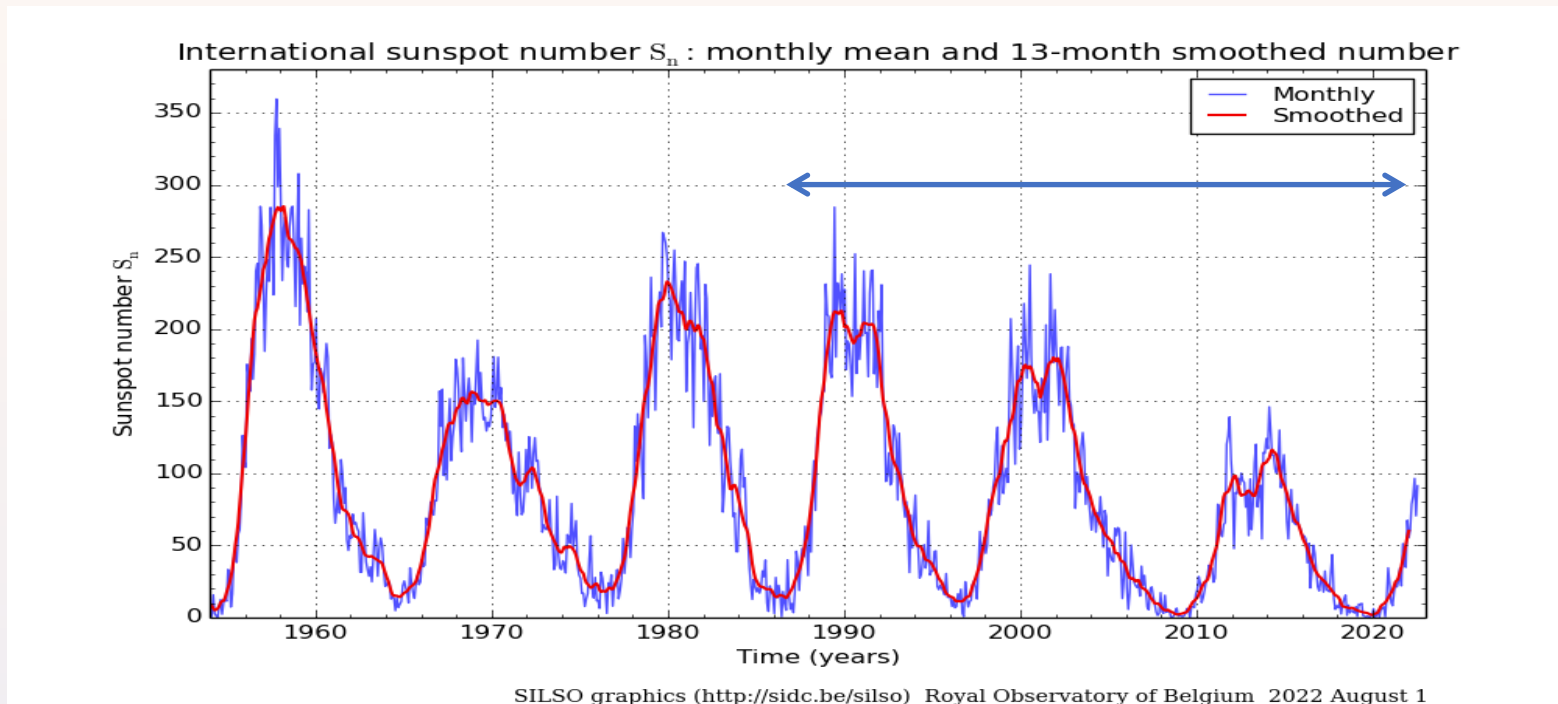


РЕЗУЛЬТАТЫ МНОГОЛЕТНИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ СРЕДНЕШИРОТНОЙ НИЖНЕЙ ТЕРМОСФЕРЫ ЗЕМЛИ

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

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ
по проекту № 20-17-00050.

Геофизические условия при измерениях температуры



1. Охвачено более трех солнечных циклов с 1987 по 2022 гг.: 1987, 1990-1991, 1996, 1999, 2001-2019, 2021-2022.
2. Три частичных затмения Солнца.
3. В разные годы разные месяцы в четырех сезонах.
4. От восхода до захода Солнца в условиях отражения нагревной волны от слоя F2 для создания искусственных периодических неоднородностей.
5. В основном, при спокойном геомагнитном поле или слабой возмущенности.
6. В условиях распространения атмосферных волн.

Создание неоднородностей, метод ИПН

Искусственные периодические неоднородности (ИПН) формируются в плазме в поле мощной стоячей радиоволны, образующейся в результате интерференции падающей на ионосферу и отраженной от нее волн. В пучностях стоячей волны происходит нагрев электронного газа, в результате чего возникает периодическая структура возмущения температуры с пространственным периодом Λ , равным половине длины λ мощной радиоволны. Температурные неоднородности, в свою очередь, формируют неоднородности электронной концентрации.

При зондировании ИПН пробными радиоволнами измеряются амплитуда и фаза рассеянного сигнала, при этом можно получить сведения о большом числе ионосферных и атмосферных параметров: температуре и плотности нейтральной атмосферы, скоростях регулярных вертикальных и турбулентных движений, электронной концентрации и др.

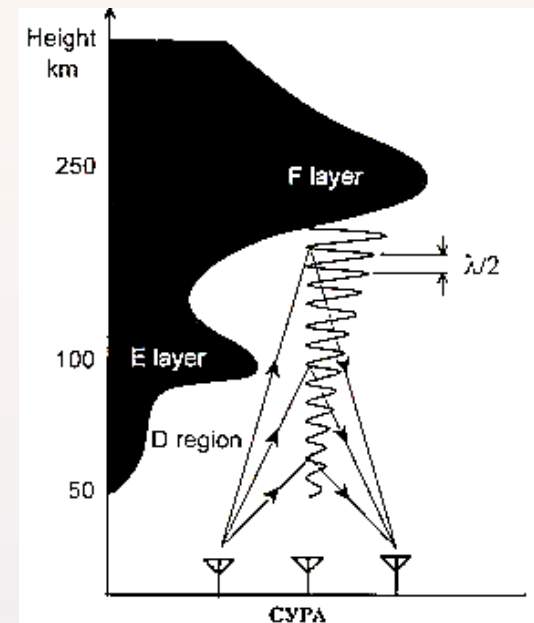
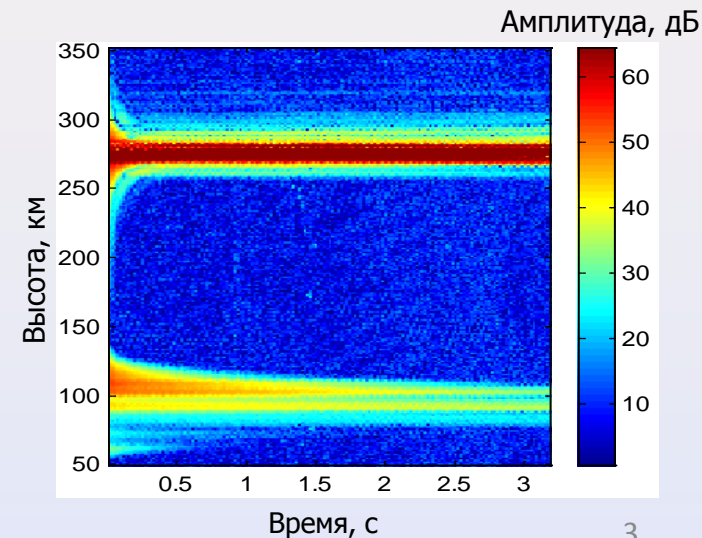
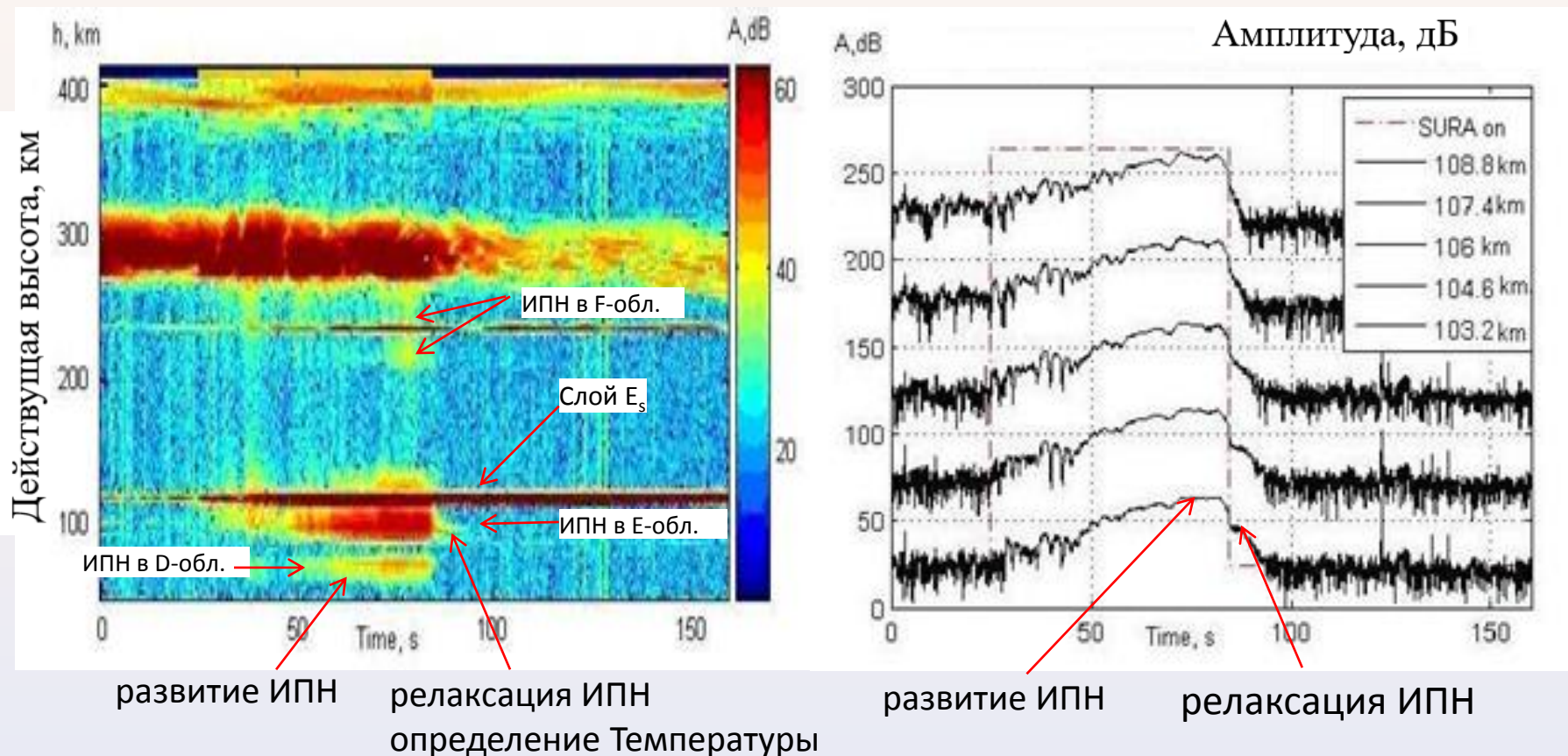


Схема создания ИПН

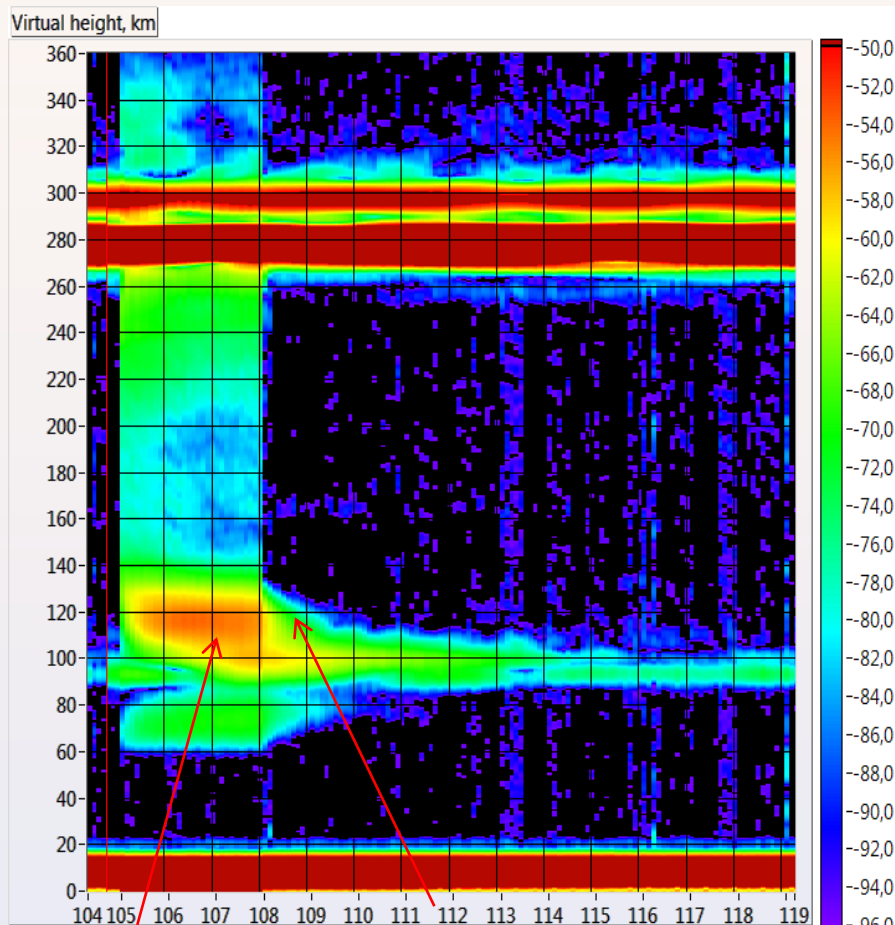


Пример развития и релаксации ИПН 16.07.2006, СУРА частота 4,785 МГц, X-нагрев, 11:31:39–11:34:39



Температура нейтральной компоненты определяется на стадии релаксации сигнала, рассеянного неоднородностями, то есть в невозмущенных условиях.

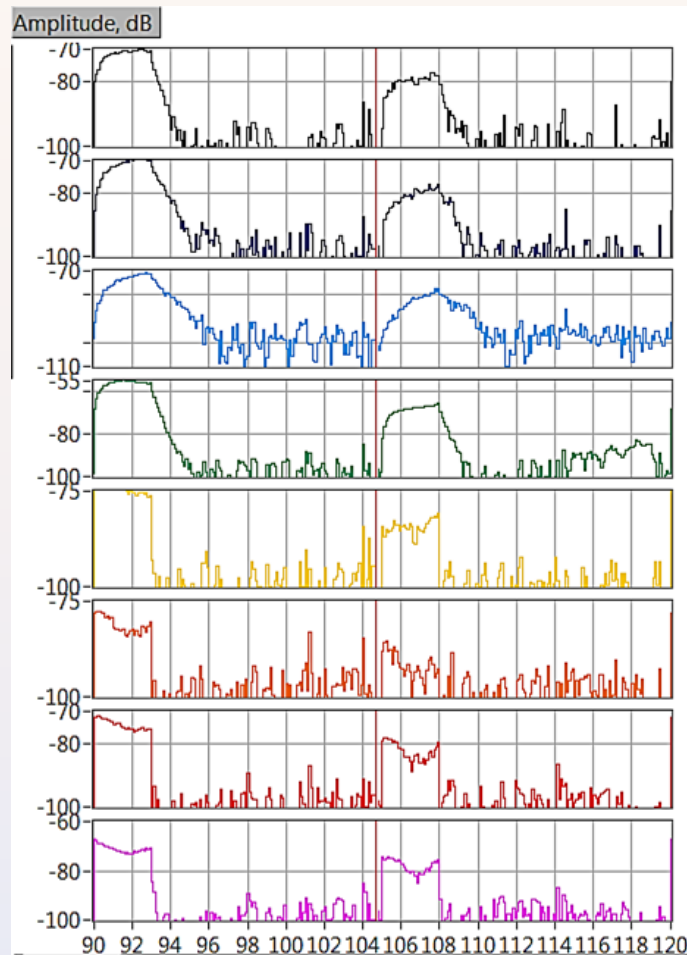
Пример развития и релаксации ИПН, СУРА, частота 4,3 МГц, X-нагрев, 15:00, 02.09.2021



Время, с

развитие ИПН релаксация ИПН

Пример сравнительно длительной релаксации неоднородностей.

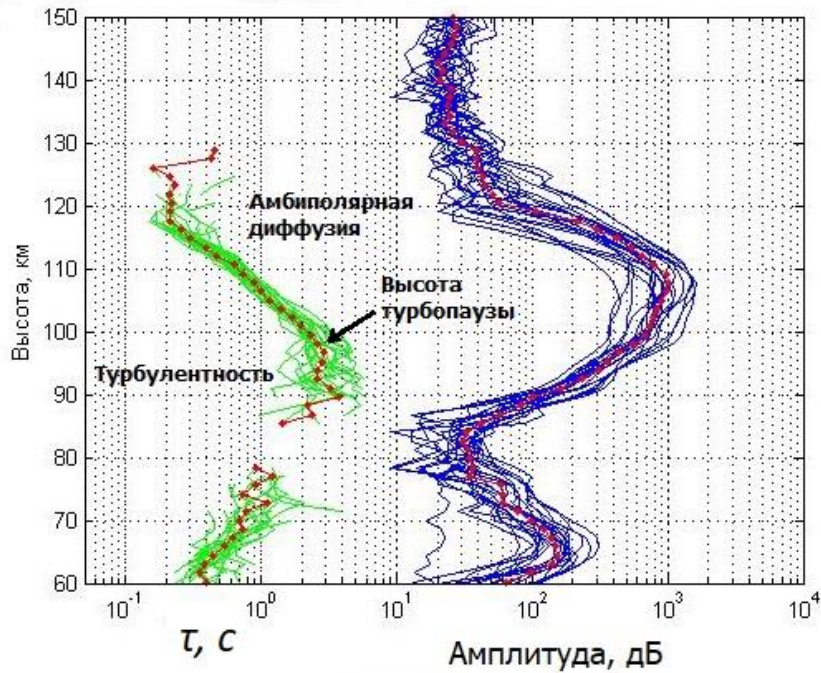


Время, с

Развитие и релаксация рассеянного сигнала на нескольких высотах от D-области до F-слоя.

Высоты 70, 75, 80, 120, 140, 200, 230, 250 км

Высотные профили характеристик рассеянного сигнала



Высотные профили амплитуды A рассеянного сигнала (правая панель) и времени релаксации τ (левая панель) для одного из пятиминутных сеансов измерений 28.09.2018

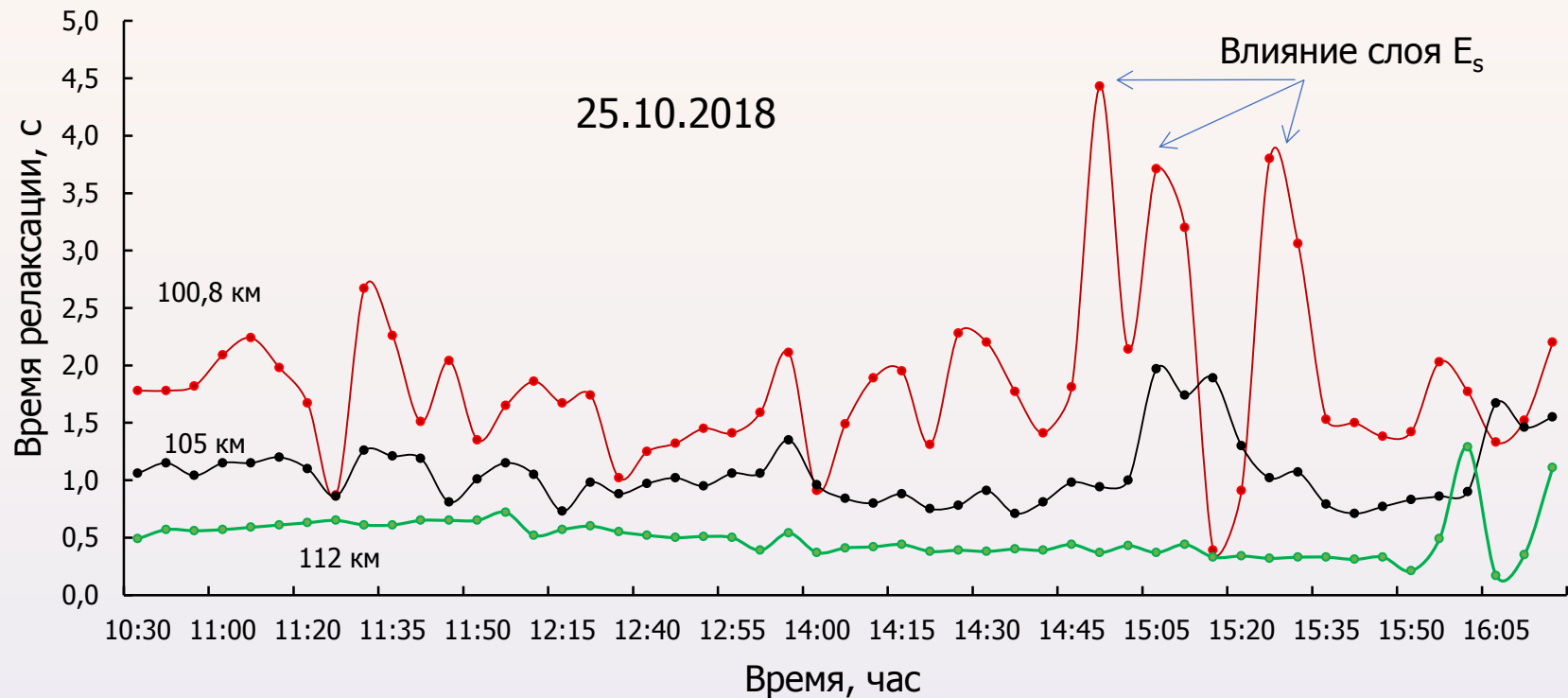
На высотах 90-130 км релаксация ИПН определяется амбиполярной диффузией. Зависимость времени релаксации τ от характеристик ионосферы и нейтральной атмосферы имеет вид:

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

где κ_B – постоянная Больцмана, $K = 4\pi/\lambda$ – волновое число стоячей волны, $\lambda = \lambda_0/n$ – длина волны в среде, D – коэффициент амбиполярной диффузии, M_i – молекулярная масса ионов, T_{e0} и T_{i0} – фоновые (невозмущенные) значения температуры электронов и ионов, T – температура нейтралов (равенство $T_{e0} = T_{i0} = T$ выполняется в средних широтах до высоты 130 км), v_{im} – частота столкновений ионов с молекулами.

Выражение для τ лежит в основе определения большинства параметров ионизованной и нейтральной составляющих нижней термосферы.

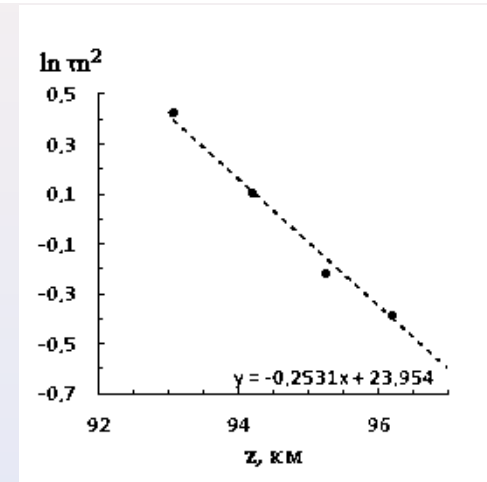
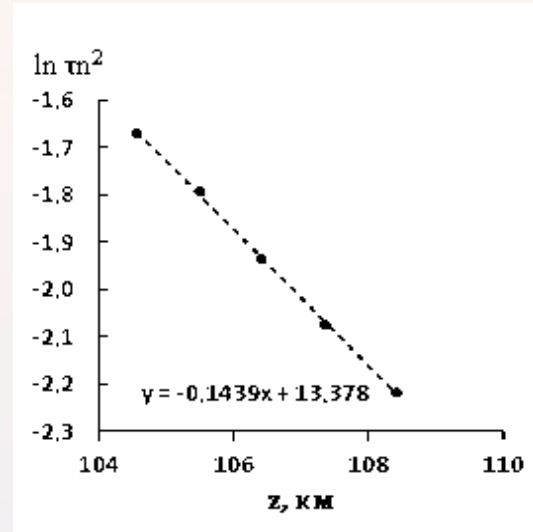
Время релаксации рассеянного сигнала - особенности высотно-временных вариаций



Особенности высотно-временного хода времени релаксации определяют и особенности вариаций температуры. На рисунке видно уменьшение значений τ с высотой в соответствии с диффузионным характером релаксации ИПН; влияние атмосферных волн с периодом от 10-20 минут до нескольких (здесь до 3-х) часов; влияние слоя E_s с увеличением τ вследствие роста M_i из-за появления тяжелых положительных металлических ионов.

Алгоритм определения температуры

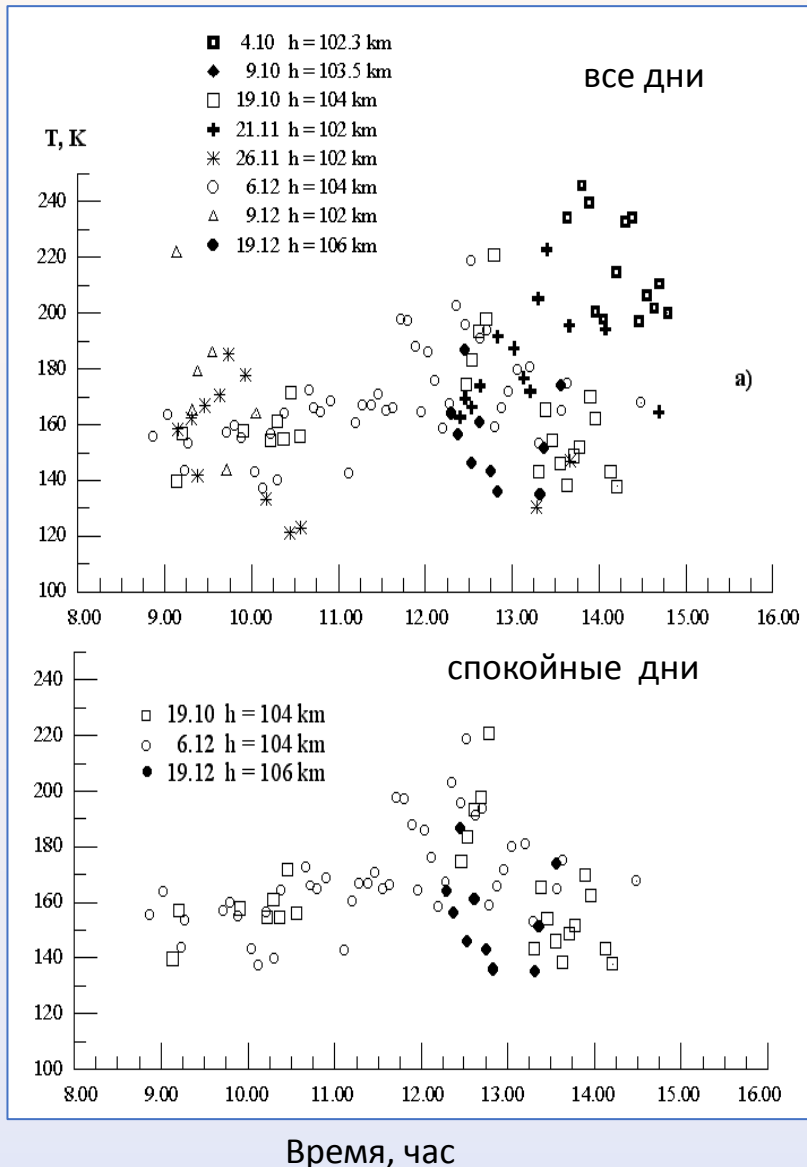
1. Расчет температуры производится на стадии релаксации неоднородностей, то есть уже в невозмущенной среде.
2. Выбираются сеансы без атмосферной турбулентности и без спорадического слоя E. Слой E_s создает локальный максимум на высотном профиле τ , а турбулентность уменьшает значения τ по сравнению с диффузионным временем.
2. Выполняется расчет времен релаксации $\tau(h, t)$ в зависимости от действующей высоты h и времени t по уменьшению амплитуды принимаемого сигнала в e раз.
3. Производится усреднение рассчитанных значений τ для сглаживания флуктуаций по интервалу времени 5-10 минут.
4. Задается высотный профиль электронной концентрации $N(h)$ - реальный или модельный.
5. Производится расчет коэффициента преломления волны n для вычисления волнового числа K стоячей волны (входит в выражение для τ) в исследуемом высотном интервале.
6. Производится расчет коэффициента линейной регрессии для функции $\ln(\tau \cdot n^2) = -bz + a$, где $b = 1/H$ и высоты однородной атмосферы H по нескольким соседним значениям τ .
7. Производится расчет температуры $T = mgH/k_B$ на каждой высоте.
8. Погрешность определения температуры составляет 5-10%.



Температура в спокойных и возмущенных условиях

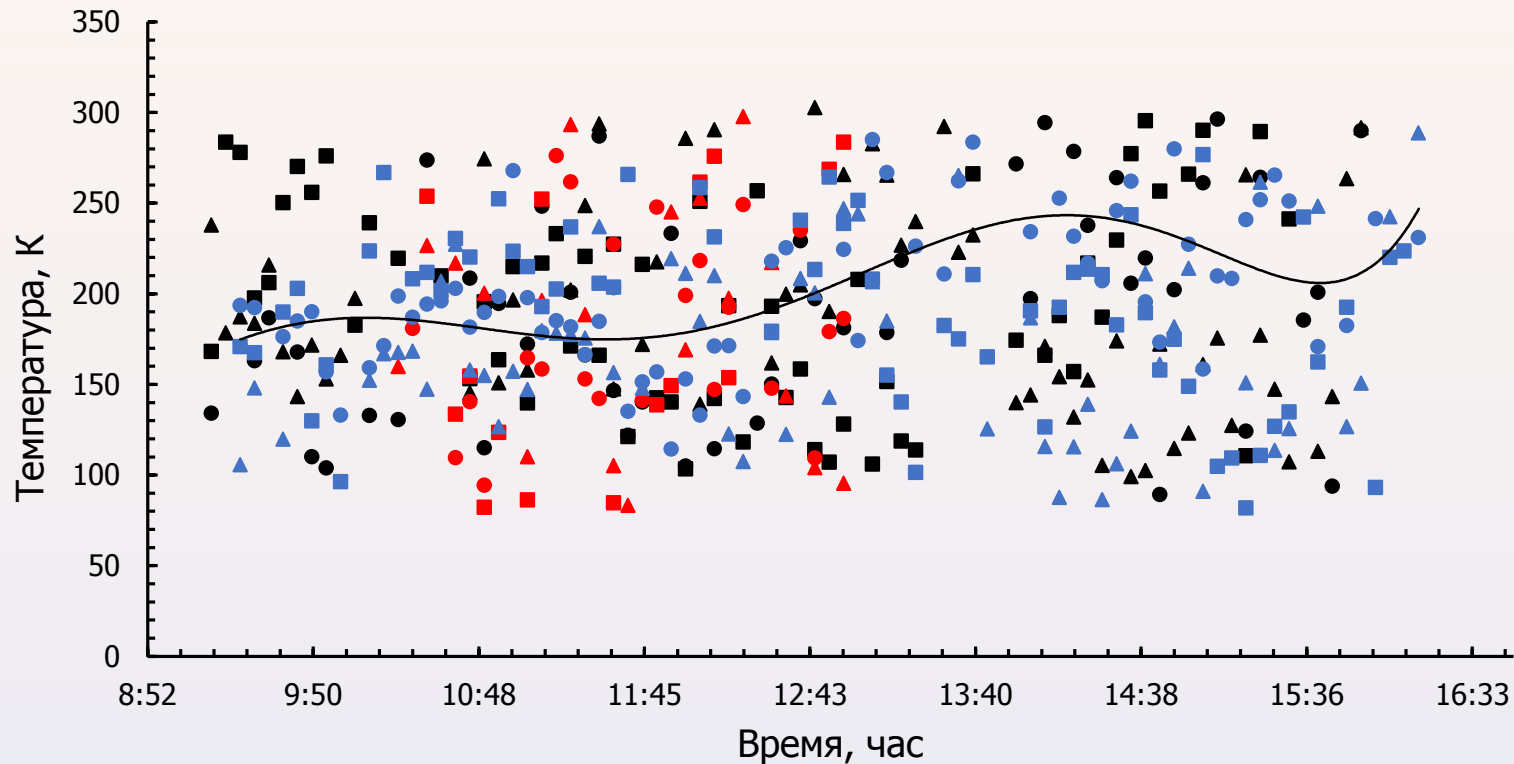
Октябрь-Декабрь 1991 г.

Спокойные дни $Kp < 3$, возмущенные - $Kp > 3$ и в условиях сильной волновой активности.



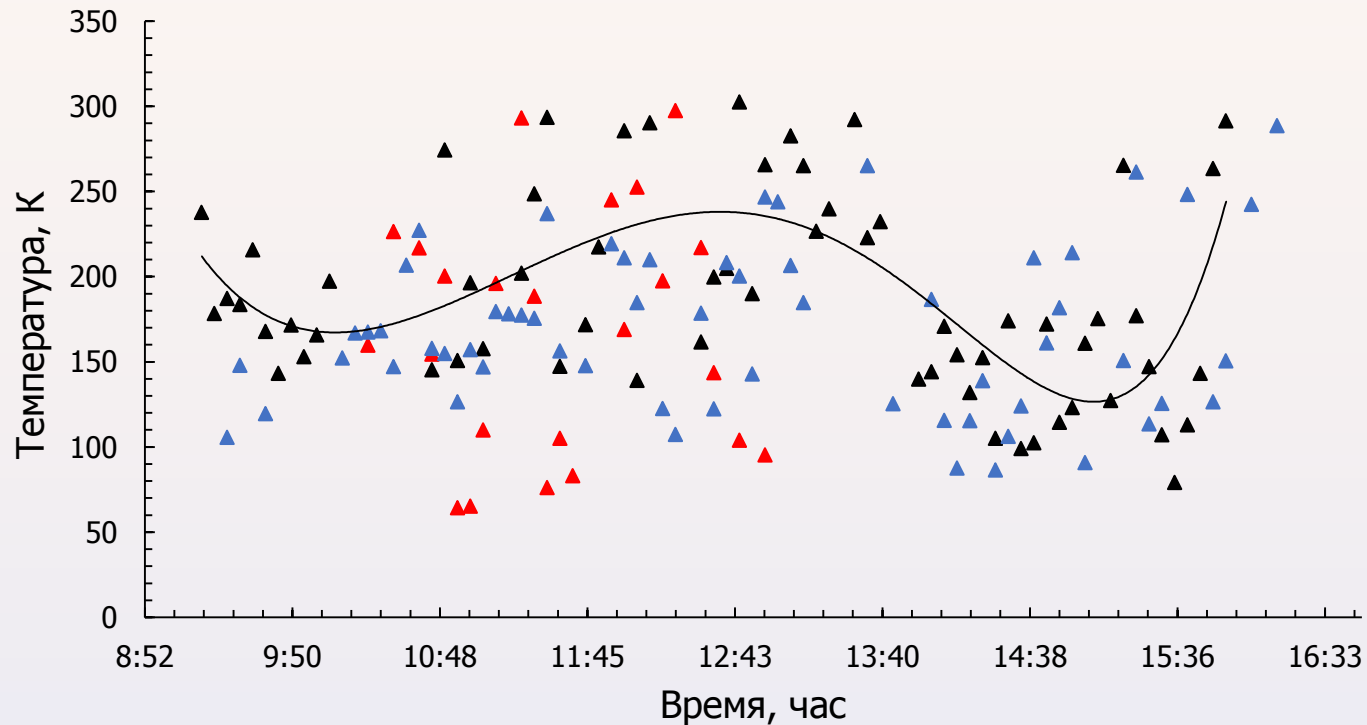
1. Большой разброс значений температуры, основной вклад в разброс дают возмущённые дни.
2. Различия в индивидуальных измерениях температуры: в утренние часы до 50 К, в послеполуденные – более 100 К.
3. В спокойные дни: рост температуры от 150 К в утренние часы до 175 К в полдень и ее снижение к вечеру. Разброс значений относительно средней величины составил в эти дни от 8% утром до 22% в полдень.
4. Геомагнитные возмущения и распространение атмосферных волн приводят к заметным изменениям температуры - в данном примере на высотах 102-106 км.
5. Это измерения относятся к годам высокой солнечной активности.

Изменение температуры на трех высотах в дневные часы 24-26 октября 2018 г.



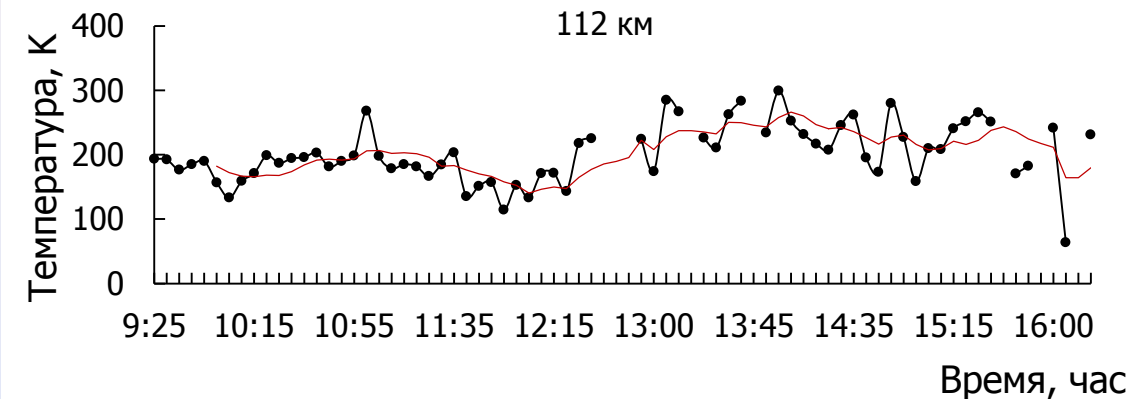
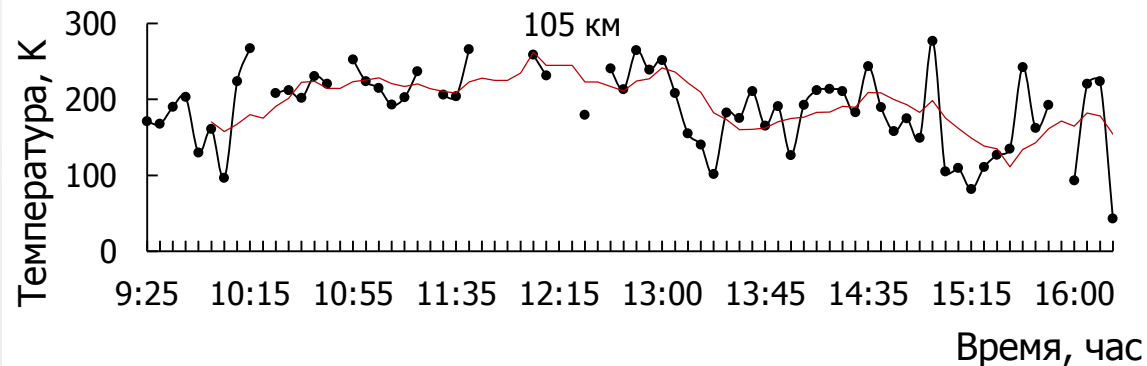
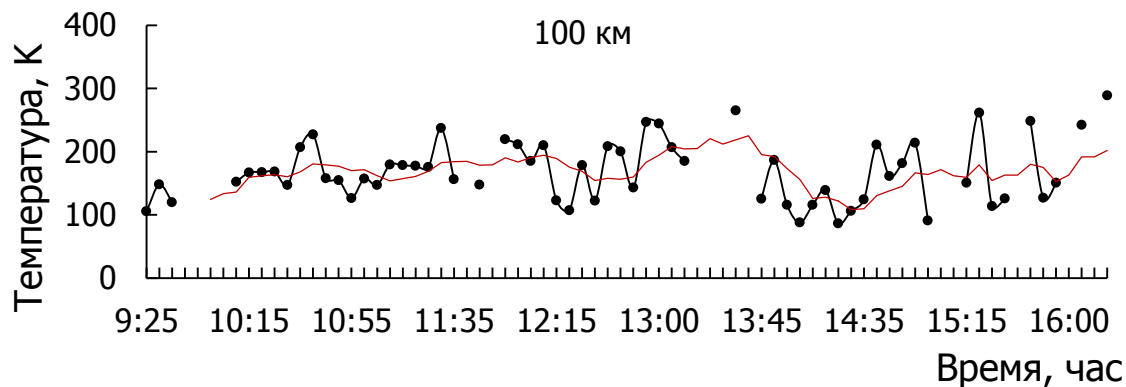
Треугольники – 100 км, квадраты – 105 км, кружки – 112 км. Синий цвет – 24 октября, красный – 25 октября, черный – 26 октября. Имеет место большой разброс значений температуры от 85 К до 300 К. Геомагнитная обстановка была спокойной.

Изменение температуры на высоте 100 км в дневные часы 24-26 октября 2018 г.



Синий цвет – 24 октября, красный – 25 октября, черный – 26 октября. Получено некоторое количество низкие значений температур < 100 К утром и в после полуденные часы с ростом температуры к вечеру.

Температура на трех высотах 25.10.2018



Приведены усредненные за каждые 5 минут значения температуры.

* Глубокие вариации температуры в течение дня от 100 К до 280 К.

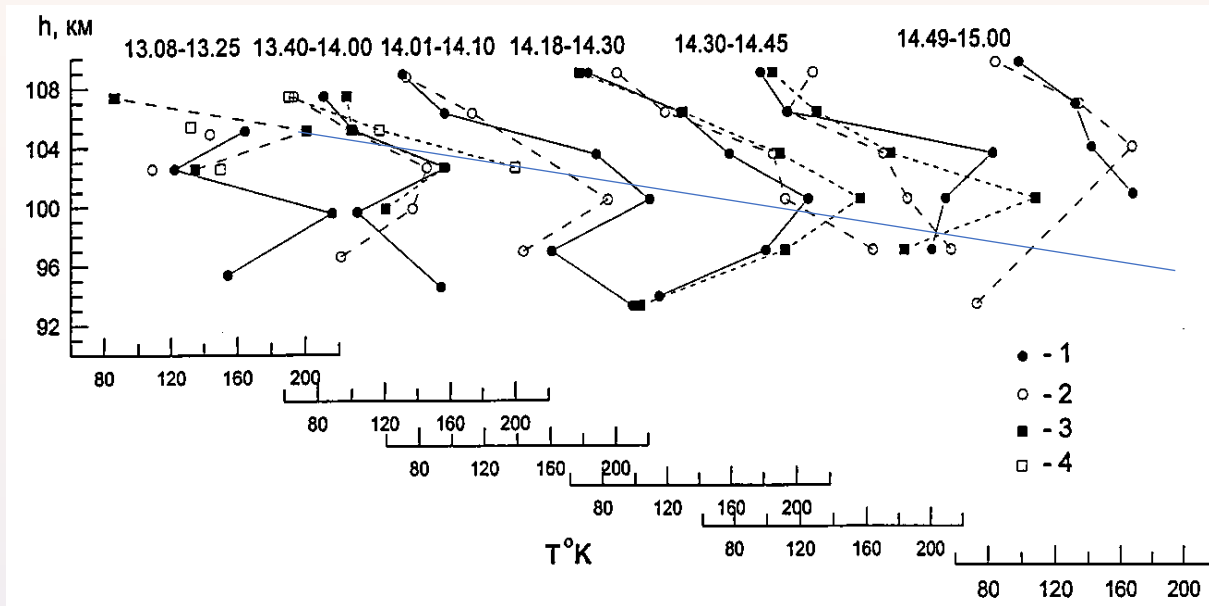
* Волновые вариации температуры, часто имевшие нестабильный характер.

* Подобные вариации могут быть обусловлены распространением внутренних гравитационных волн (ВГВ).

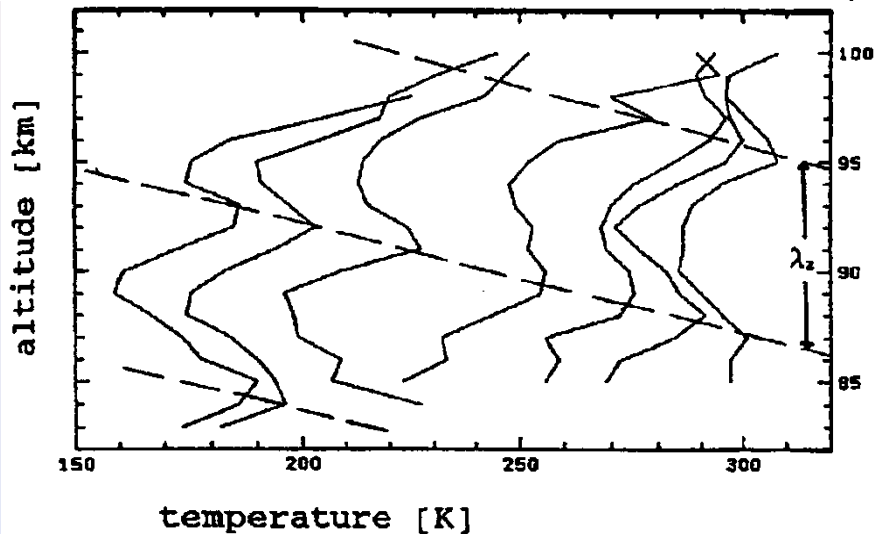
* Ярко выражены периоды волновых движений от 10-15 минут до 2-х часов.

* Красная линия – результат скользящего усреднения по 30 минутному интервалу.

Проявление атмосферных волн в высотном профиле температуры

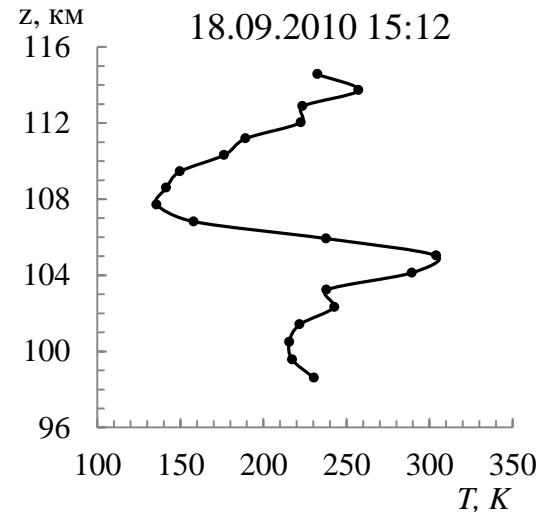
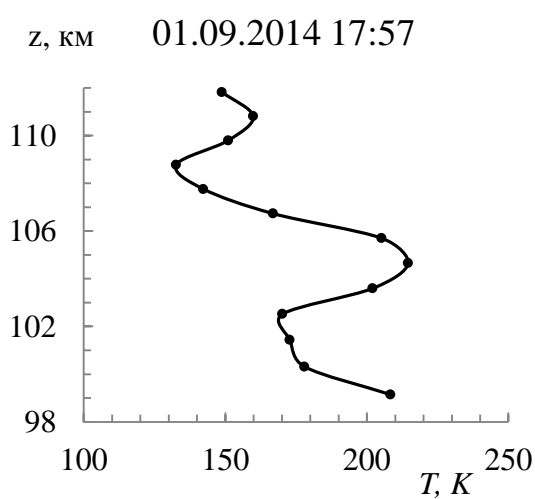
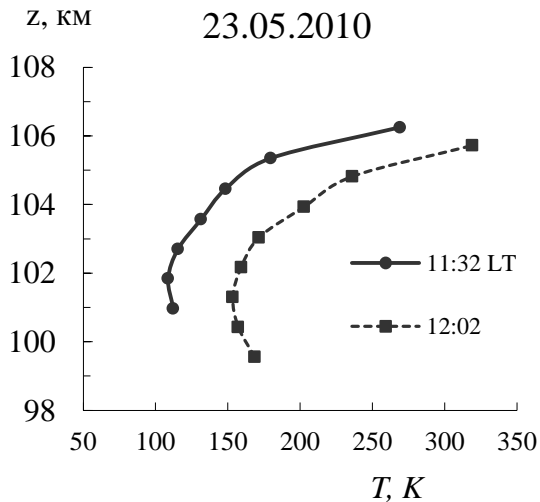
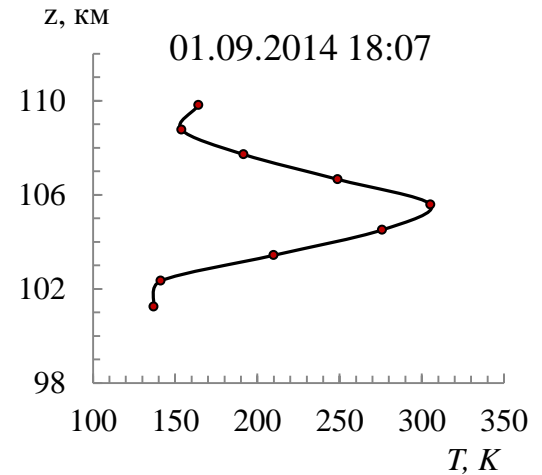
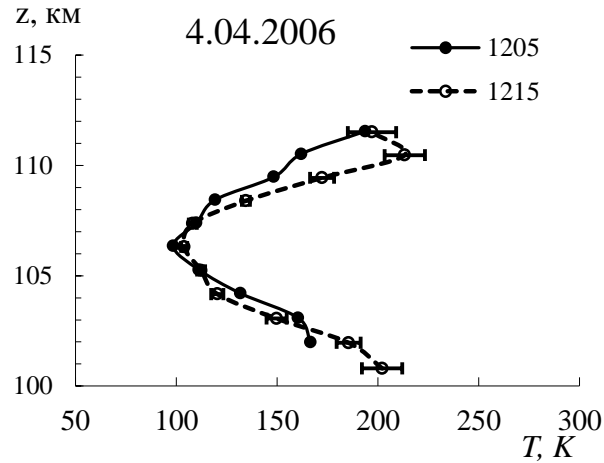
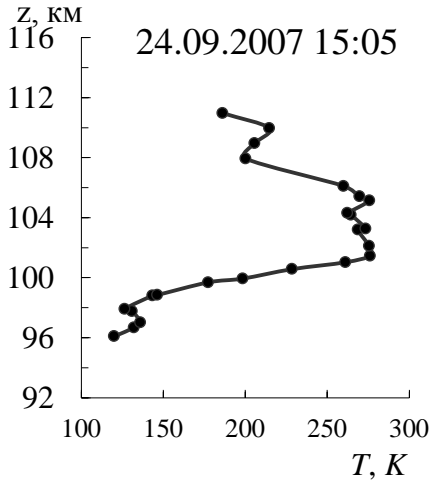


ИПН, 12.08.1999 – день после затмения Солнца. Изменение высотного профиля температуры (каждый за 5 минут) при распространении ВГВ. Масштаб волны по высоте порядка 5 км.



Картина распространения ВГВ на примере изменения получасовых высотных профилей температуры (натриевый лидар). Каждый последующий профиль сдвинут на 15 К. Период волны 5 часов, длина волны по высоте 8 км (Григоренко Е.И. и др. Вестник Харьковского политехнического института, 1987, вып 5.)

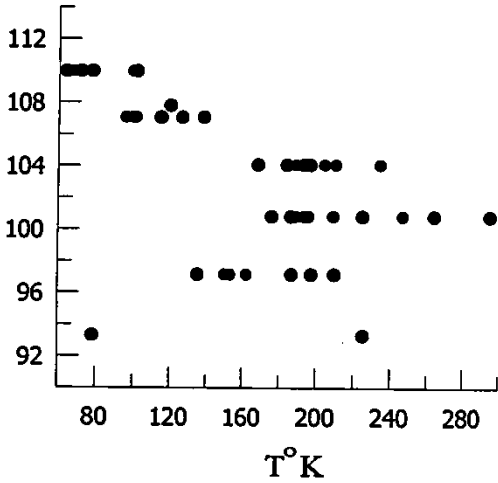
Высотные профили температуры в разные годы и сезоны



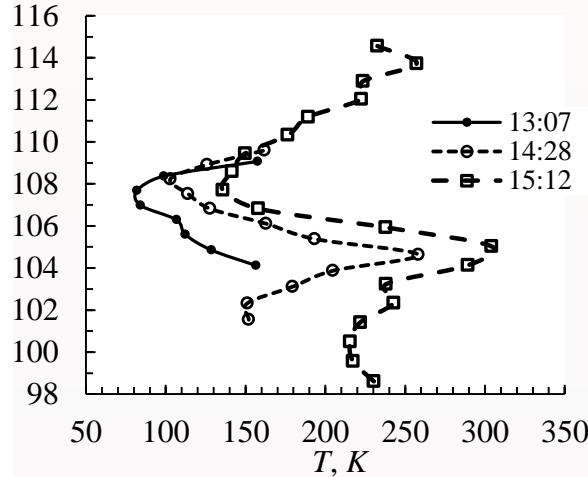
Наблюдается большое разнообразие высотных профилей температуры как сравнительно гладких, так и нерегулярных.

Высотные профили температуры в разные годы и сезоны

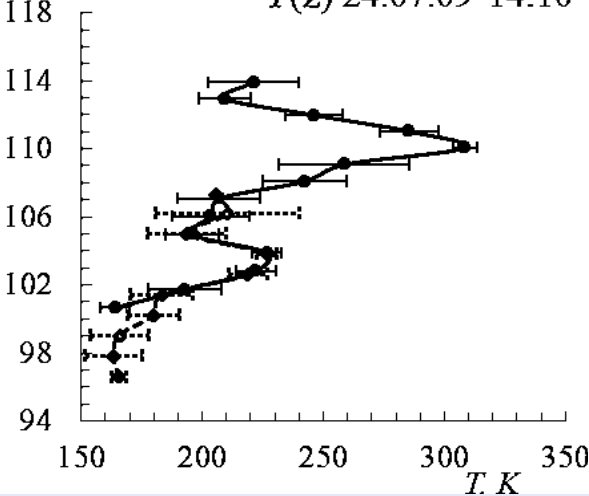
h, км 12.08.1999 15.00-16.00



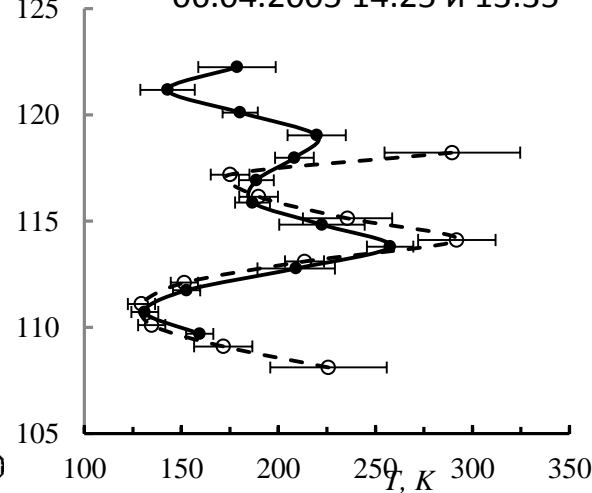
z, км 18.08.2010



Z, км T(z) 24.07.09 14:10



Z, км 06.04.2005 14:25 и 13:35



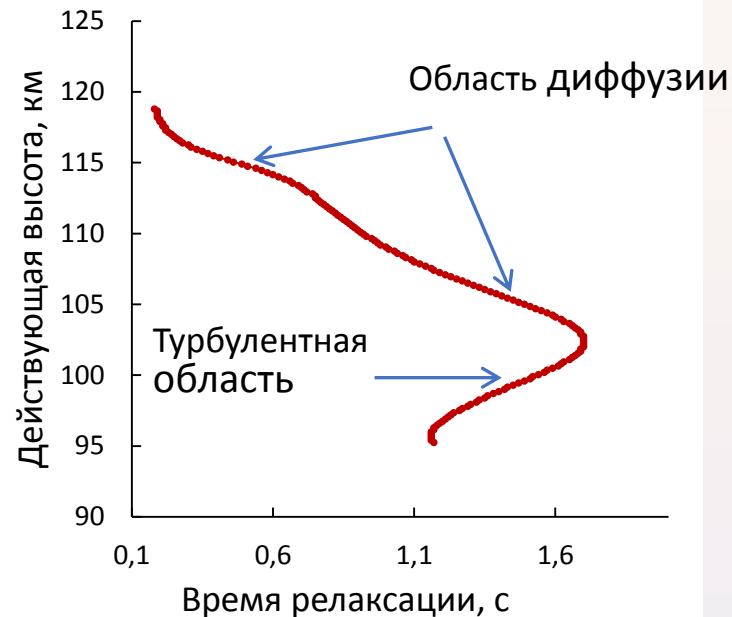
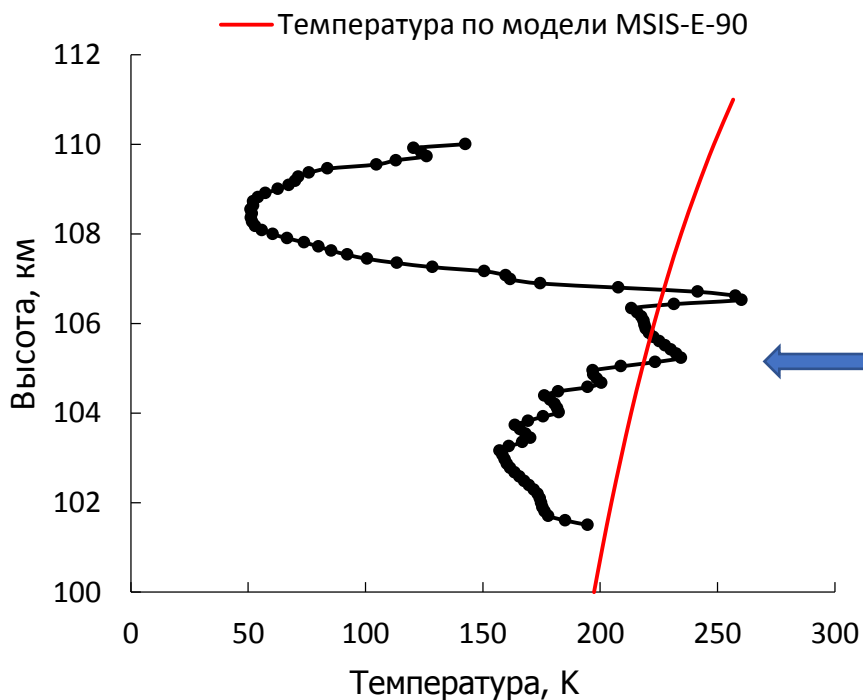
Примеры нерегулярных профилей температуры как следствие влияния гидродинамических неустойчивостей среды и распространения ВГВ.

- * Масштаб изменений по высоте от 5 до 15 км.
- * Локальные максимумы и минимумы температуры на разных высотах.
- * Бары – погрешность измерений, включая статистическую, до 10%.
- * Нижний минимум может находиться на 90-95 км – двухуровневая мезопауза?

Сравнение высотного профиля температуры с расчетом по модели MSIS-E-90

Пример – 03.09.2021, 13:30

Для расчета T выбирается участок высотной зависимости времени релаксации $\tau(h)$ вне турбулентной области.



Значения температуры группируются около модельного профиля лишь в небольшом интервале высот, на других высотах сильно отличаясь от него.

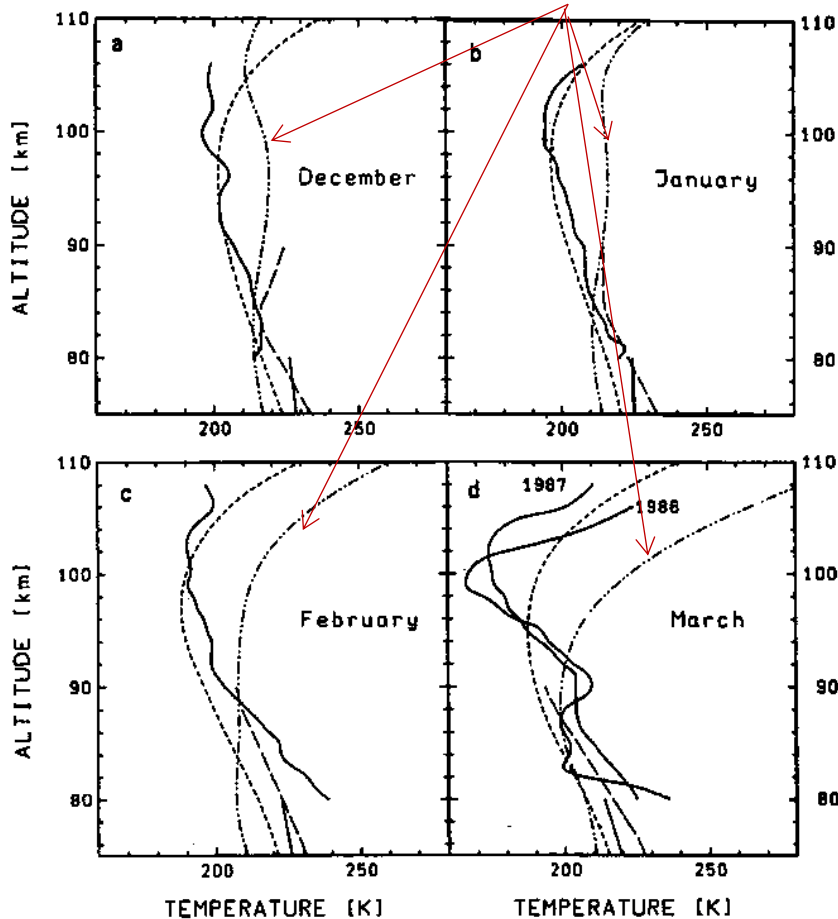
Высотные профили температуры и модель

R. Neuber et al. JGR, No. D9, p.11093, 1988.

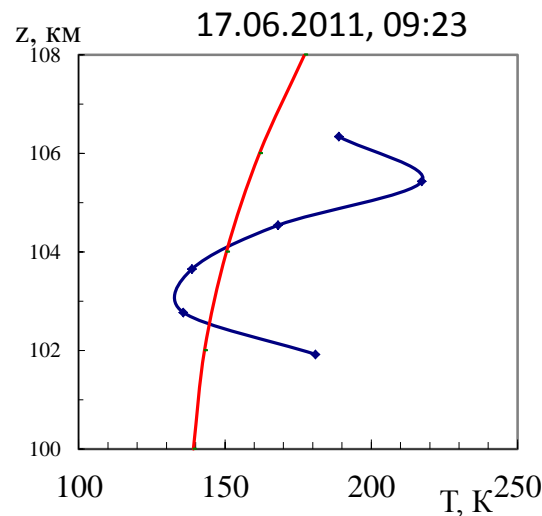
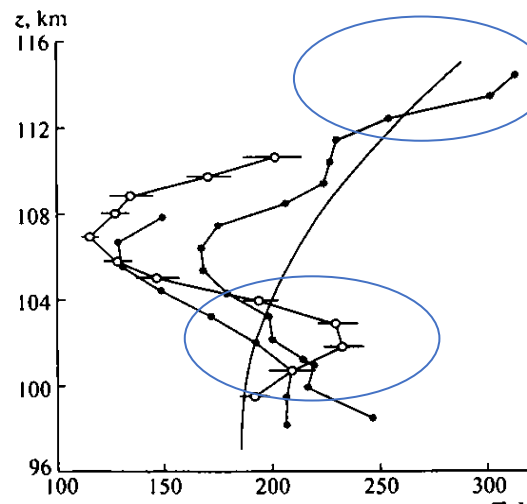
Monthly Mean Profiles

модель

Метод ИПН, 04.10.2006. 12.00-13.00



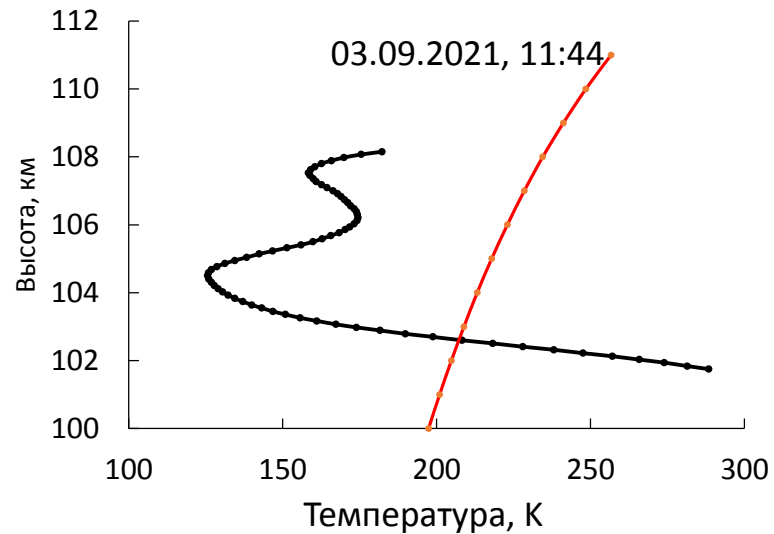
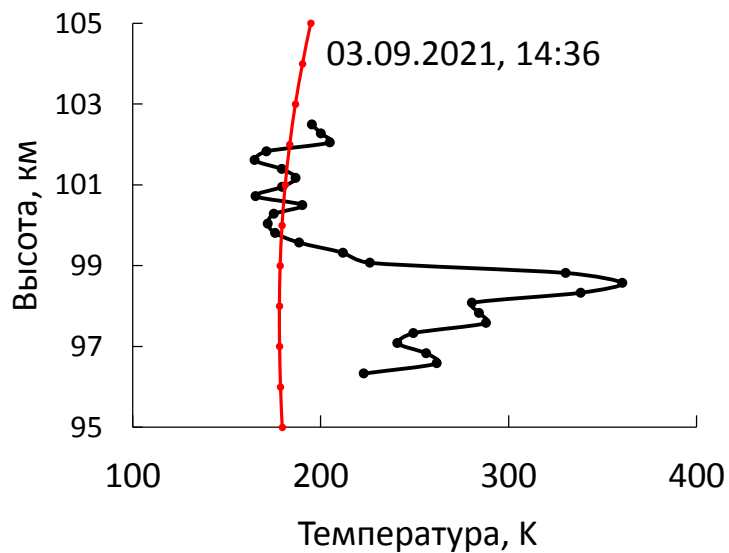
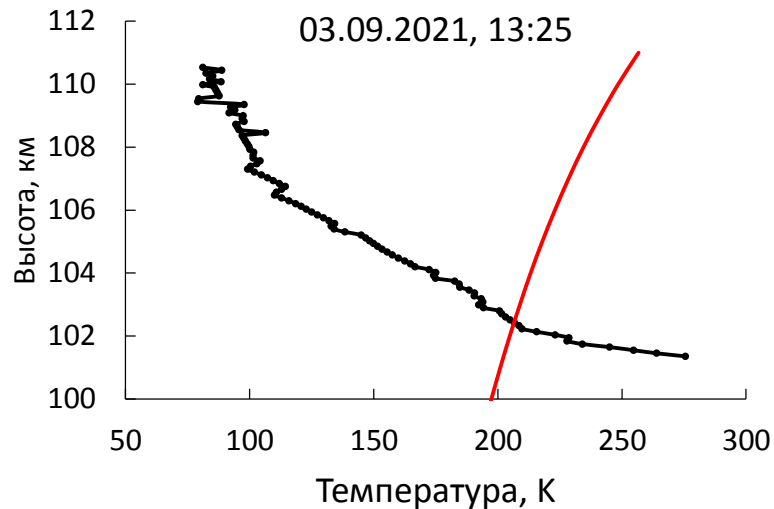
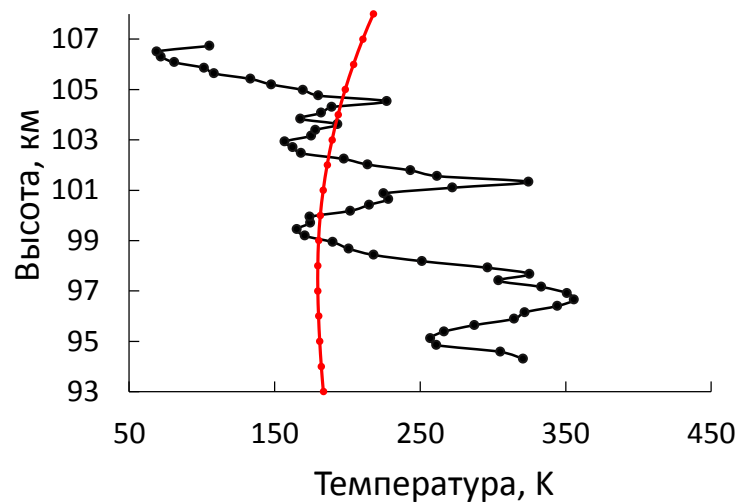
Сравнение среднемесячных профилей температуры, полученных разными методами, с моделью CIRA 1972.



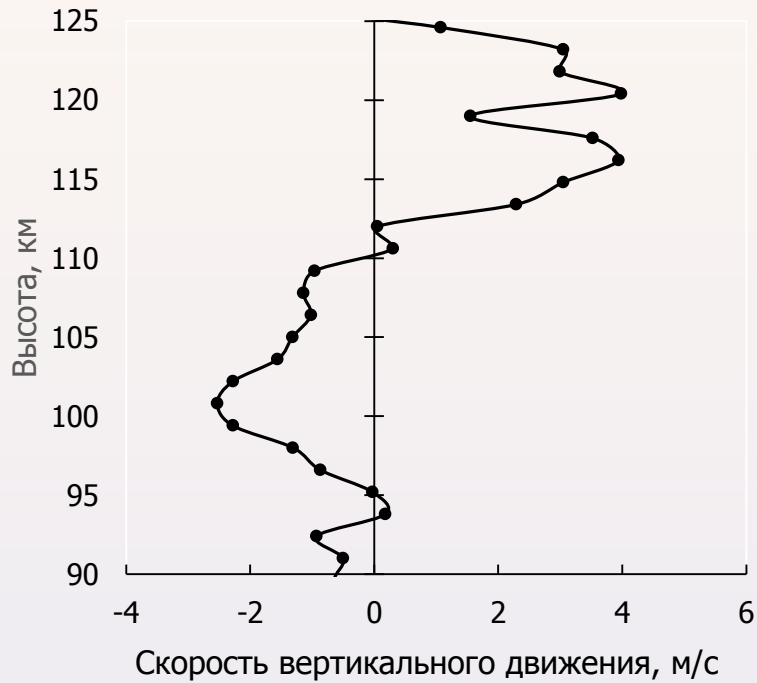
Для расчета температуры использован реальный профиль $N(z)$, измеренный двухчастотным методом создания ИПН. Соответствие измеренного профиля температуры и модельного имело место лишь в ограниченном интервале высот.

Сравнение высотного профиля температуры с расчетом по модели MSIS-E-90

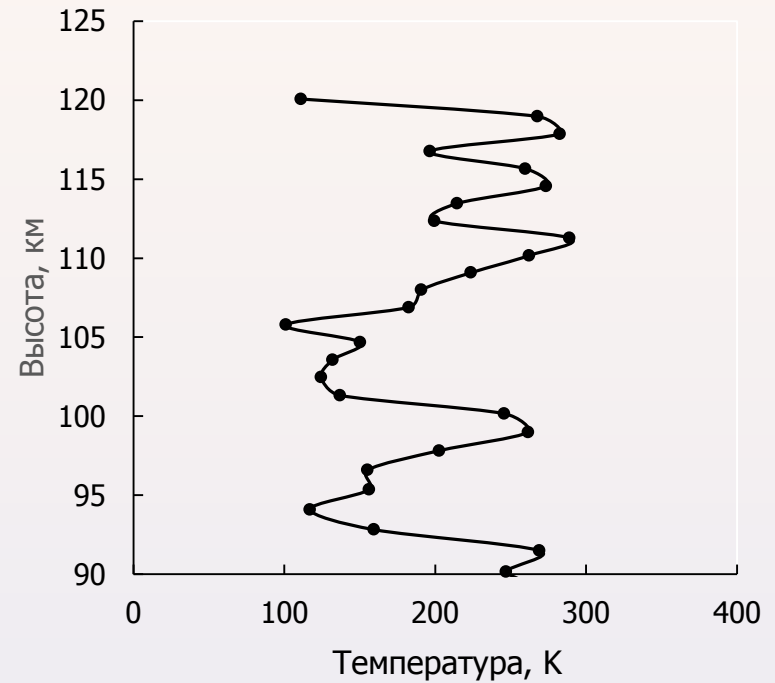
Для расчета $T(z)$ использованы модельные профили $N(z)$



Высотные вариации скорости и температуры 26.10.2018, 14:05



Высотные вариации скорости вертикального движения, масштаб изменений по высоте 4-5 км.



Высотные вариации температуры нейтральной атмосферы, масштаб изменений по высоте 4-7 км.

Нерегулярный характер изменений температуры с высотой имеет место и для других параметров ионосферы и нейтральной атмосферы.

ВЫВОДЫ

1. Подтверждена большая изменчивость температуры нейтральной компоненты на высотах 90-120 км в течение дня, обусловленная, в том числе, геомагнитной и волновой активностью. В возмущенные дни имеют место значительные вариации температуры.
 2. Наблюдается нерегулярная изменчивость температуры от сезона к сезону, от дня ко дню в течение месяца.
 3. Подтверждено влияние ВГВ на параметры нейтральной компоненты. В высотно-временных вариациях времени релаксации рассеянного сигнала, температуры и плотности атмосферы постоянно присутствуют проявления волнообразных движений различных периодов. Наиболее вероятной причиной их являются ВГВ, поскольку вариации параметров происходят с периодичностью, характерной для этих волн.
 4. Сравнение профилей температуры с модельными дает в большинстве случаев их значительное отличие. Одна из причин – усреднённый характер модели и использование в определении температуры методом ИПН реального профиля электронной концентрации, в котором отражена реальная динамика ионосферы.
 5. Влияние $N(h)$ -профиля на определение температуры: при использовании реального профиля по сравнению с модельным (например, IRI) погрешность существенно меньше.
 6. Нижней границей определения температуры методом ИПН является уровень турбопаузы, находящийся по измерениям этим методом в интервале 90-110 км.
 7. Метод ИПН имеет разрешение 15 с и 1 км, что позволяет отслеживать быстрые и «мелкомасштабные» флуктуации. Обычно используется усреднение времени релаксации по интервалу времени 5 минут для сглаживания быстрых вариаций.
- Полученные методом ИПН результаты определения температуры и других параметров ионосферы и нейтральной атмосферы на высотах 90-120 км дают более сложную картину их вариаций, чем представлялось ранее.**

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

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. 156 с.
2. 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.
3. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Егерев М.Н., Толмачева А.В. Искусственные периодические неоднородности, волновые явления в нижней ионосфере и спорадический слой E // Изв. Радиофизика. 2010. Т. 53. № 2. С.77-90.
4. 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.
5. Толмачева А.В., Беликович В.В., Калинина Е.Е. Результаты измерений атмосферных параметров с помощью искусственных периодических неоднородностей с разными пространственными масштабами.// Геомагнетизм и аэрономия. 2009. Т. 49. №2. С. 254-261.
6. Tolmacheva A.V., Bakhmetieva N.V., Grigoriev G.I. , Kalinina E.E.. The main results of the long-term measurements of the neutral atmosphere parameters by the artificial periodic irregularities techniques. // *Advances in Space Research*. 2015. T.56. P. 1185–1193.
7. Бахметьева Н.В., Беликович В.В., Григорьев Г.И., Толмачева А.В. Влияние акустико-гравитационных волн на вариации параметров нижней атмосферы по наблюдениям с помощью искусственных периодических неоднородностей // Изв. Радиофизика. 2002. Т. 45, 233—242.
8. 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.
9. Bakhmetieva, N.V.; Grigoriev, G.I.; Tolmacheva, A.V.; Zhemyakov, I.N. 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.
10. 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.
11. 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>

Благодарность

Авторы благодарят сотрудников лаборатории «Васильсурск» за самоотверженный труд по обеспечению бесперебойной работы стенда СУРА в рамках базовой части Государственного задания Минобрнауки РФ по проекту № 0729-2020-0057.

Спасибо за внимание!

