



**XXIX Всероссийская ежегодная конференция по физике Солнца
"Солнечная и солнечно-земная физика – 2025"
(ССЗФ-2025)**

Секция. Активные солнечные образования, процессы и явления

ВЛИЯНИЕ ХОЛОДНЫХ СЛОЁВ ПЛАЗМЫ В НИЖНЕЙ СОЛНЕЧНОЙ КОРОНЕ НА СПЕКТР СМ–ДМ ИЗЛУЧЕНИЯ АКТИВНЫХ ОБЛАСТЕЙ

А. Г. Ступишин, Т. И. Кальтман

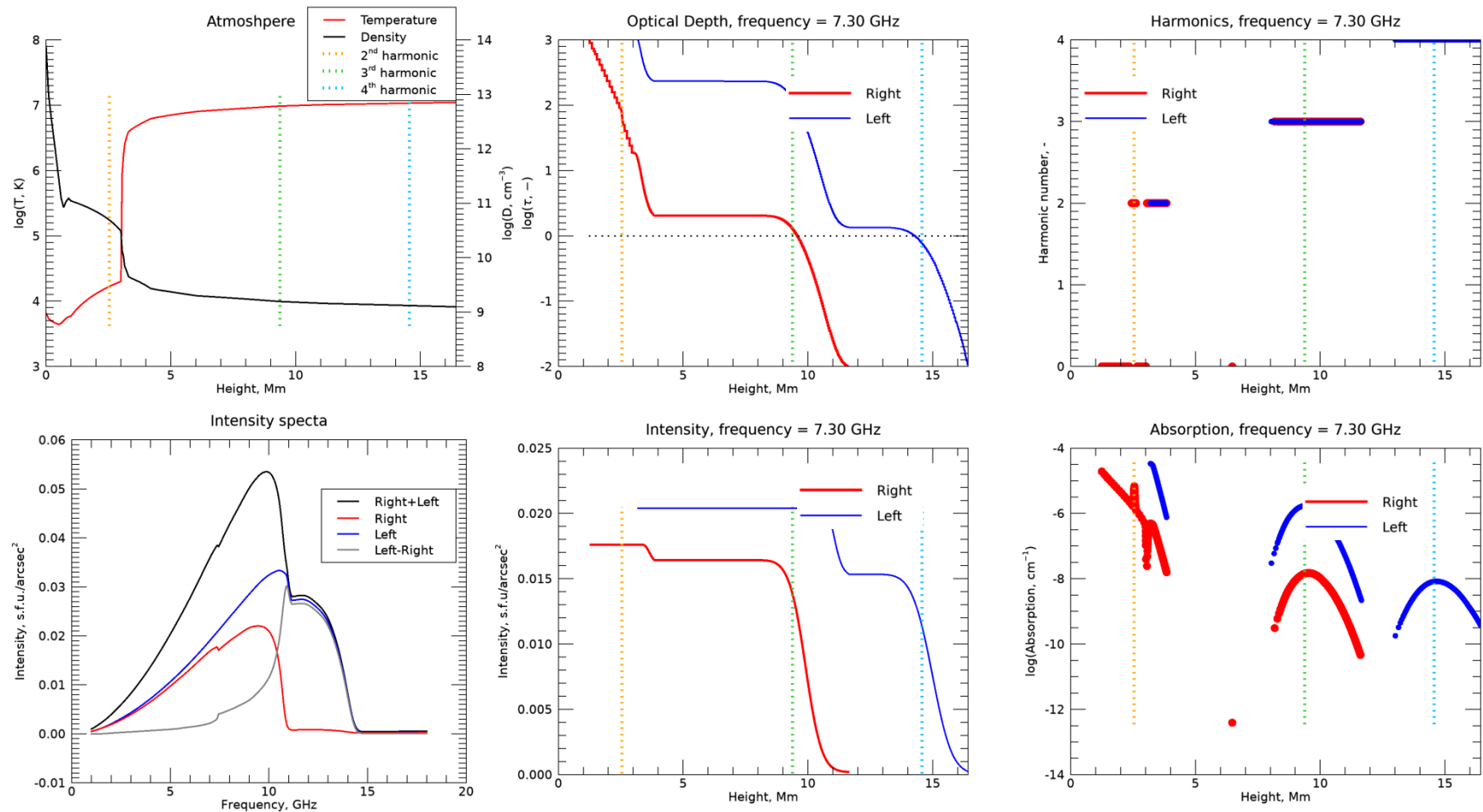
Специальная астрофизическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия

agstup@yandex.ru

Спектральные наблюдения с высоким частотным разрешением в сантиметровом и дециметровом диапазоне позволяют выявлять тонкую структуру солнечных активных областей [1]. Тепловое радиоизлучение в этих диапазонах формируется сочетанием циклотронного и теплового свободно-свободного механизмов, а наличие холодных плазменных слоёв может заметно менять спектр. В данной работе исследовано влияние таких слоёв на формирование спектральных «провалов» (депрессий). Полученные результаты позволяют оценить роль холодной плазмы в нижней короне и уточнить условия возникновения наблюдаемых особенностей см–дм спектров активных областей.

Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

1. Базовый случай без холодных слоёв



Атмосферный профиль по Selhorst et al. [2] и дипольной модели магнитного поля: вертикальные линии показывают уровни циклотронных гармоник для выбранной частоты (7.3 ГГц).

Оптическая толщина, гармоники, интенсивность вдоль луча зрения, коэффициенты поглощения : основной вклад формируется вблизи уровней циклотронных гармоник. Расчеты проведены с использованием кода [3].

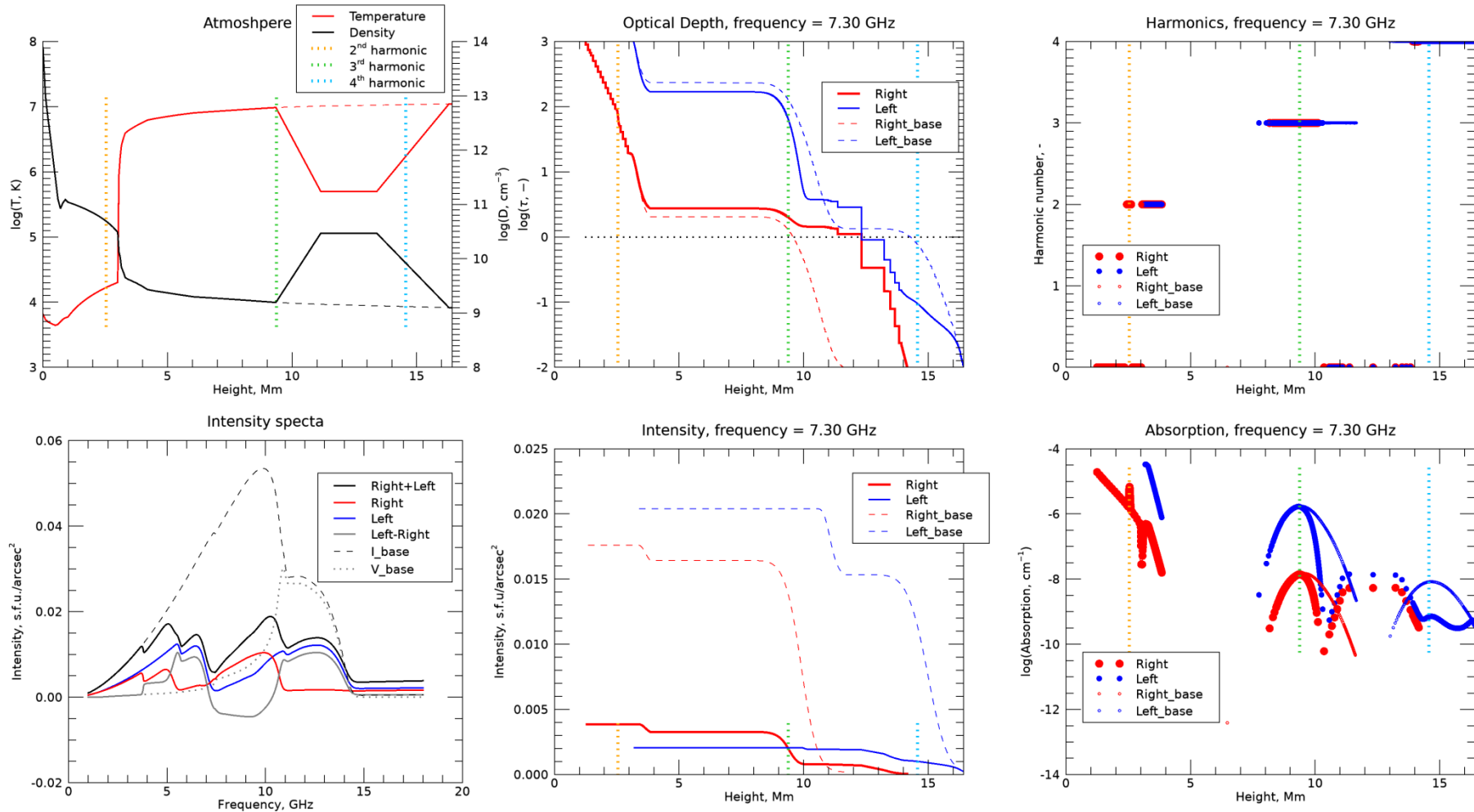
Левополяризованное излучение соответствует е-моду, правополяризованное – о-моду.

Спектры интенсивности: “базовые” спектры в обеих поляризациях, их сумма и разность, в диапазоне 1–20 ГГц.

Ниже будет показано, как меняются все характеристики излучения при разных параметрах холодного слоя.

Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

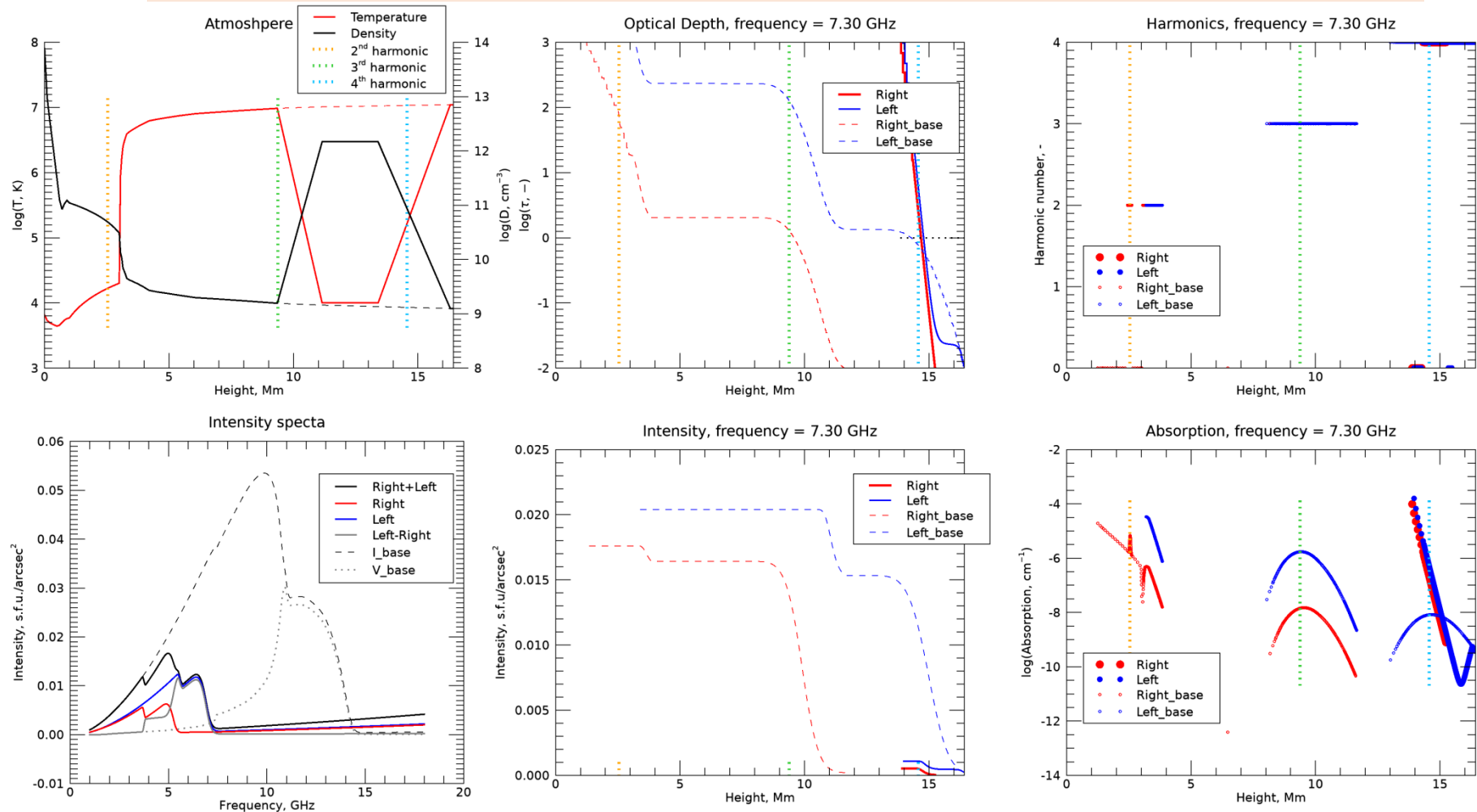
2. Холодный слой с температурой 500 тыс K на высоте 12-14 Мм



Вводится холодный слой (температура около 500 тыс. K) на высоте 12–14 Мм. Уровни третьей и четвёртой циклотронных гармоник для частоты 7.3 ГГц лежат внутри этого слоя, поэтому излучение на них формируется в более холодной и плотной плазме и наблюдается ослабленным. При постоянном давлении понижение температуры ведёт к росту электронной концентрации и усилению свободно-свободного поглощения; в результате общая интенсивность уменьшается и появляется спектральная депрессия.

Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

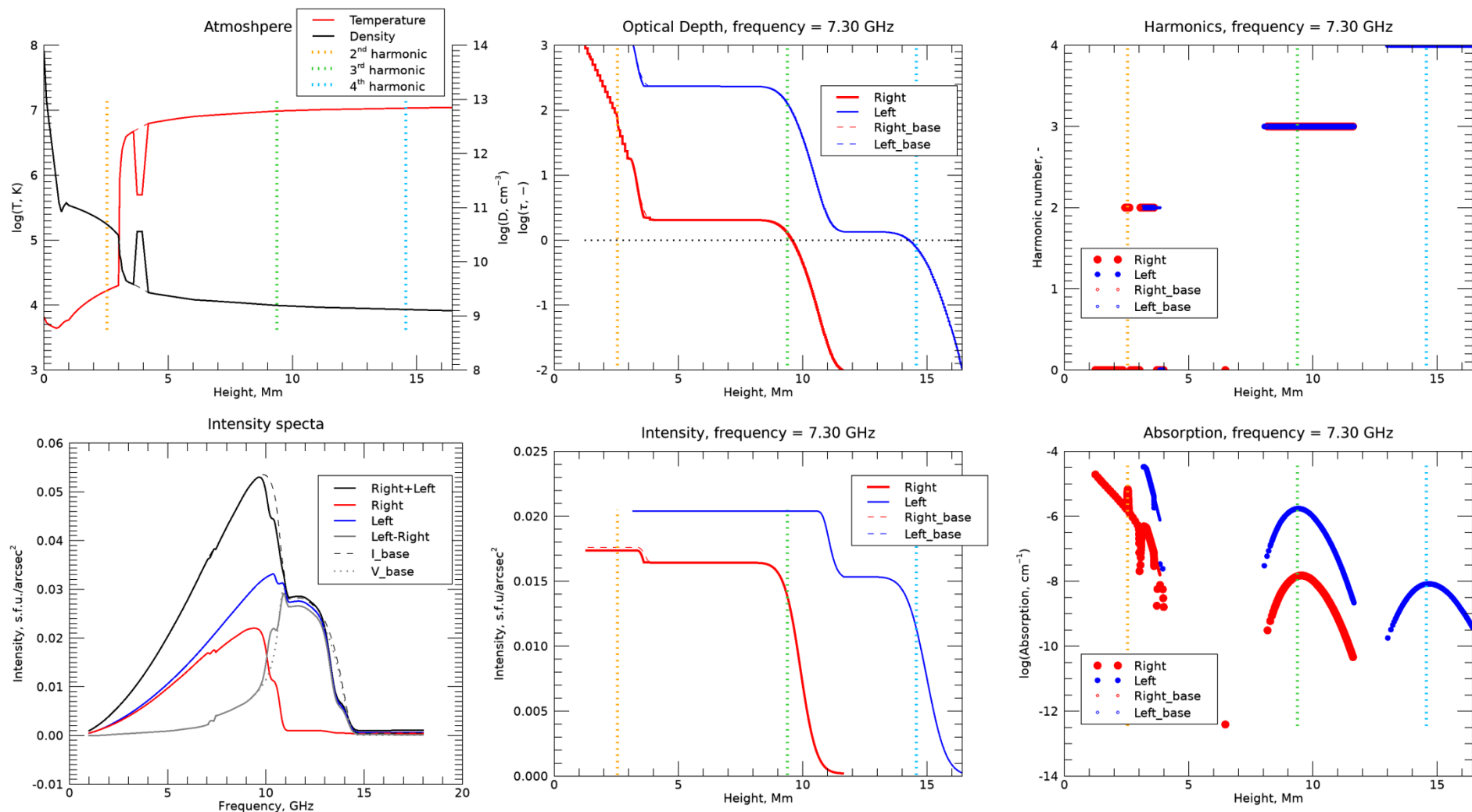
3. Холодный слой с температурой 10 тыс. К на высоте 12-14 Мм



При низкой температуре ($T \approx 10\,000\text{ K}$) плотность слоя возрастает (из условия постоянства давления), что ведёт к росту плазменной частоты. Когда плазменная частота сравнима с частотой волны ($\omega_p \gtrsim \omega$), слой становится непрозрачным и препятствует прохождению излучения снизу: до наблюдателя доходит главным образом генерация выше него, поэтому суммарная интенсивность резко уменьшается. В показанном примере на 7.3 ГГц граница холодного слоя лежит у 4-й гармоники, поэтому часть излучения с этого уровня проходит, а более низкочастотное формируется выше и регистрируется без ослабления.

Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

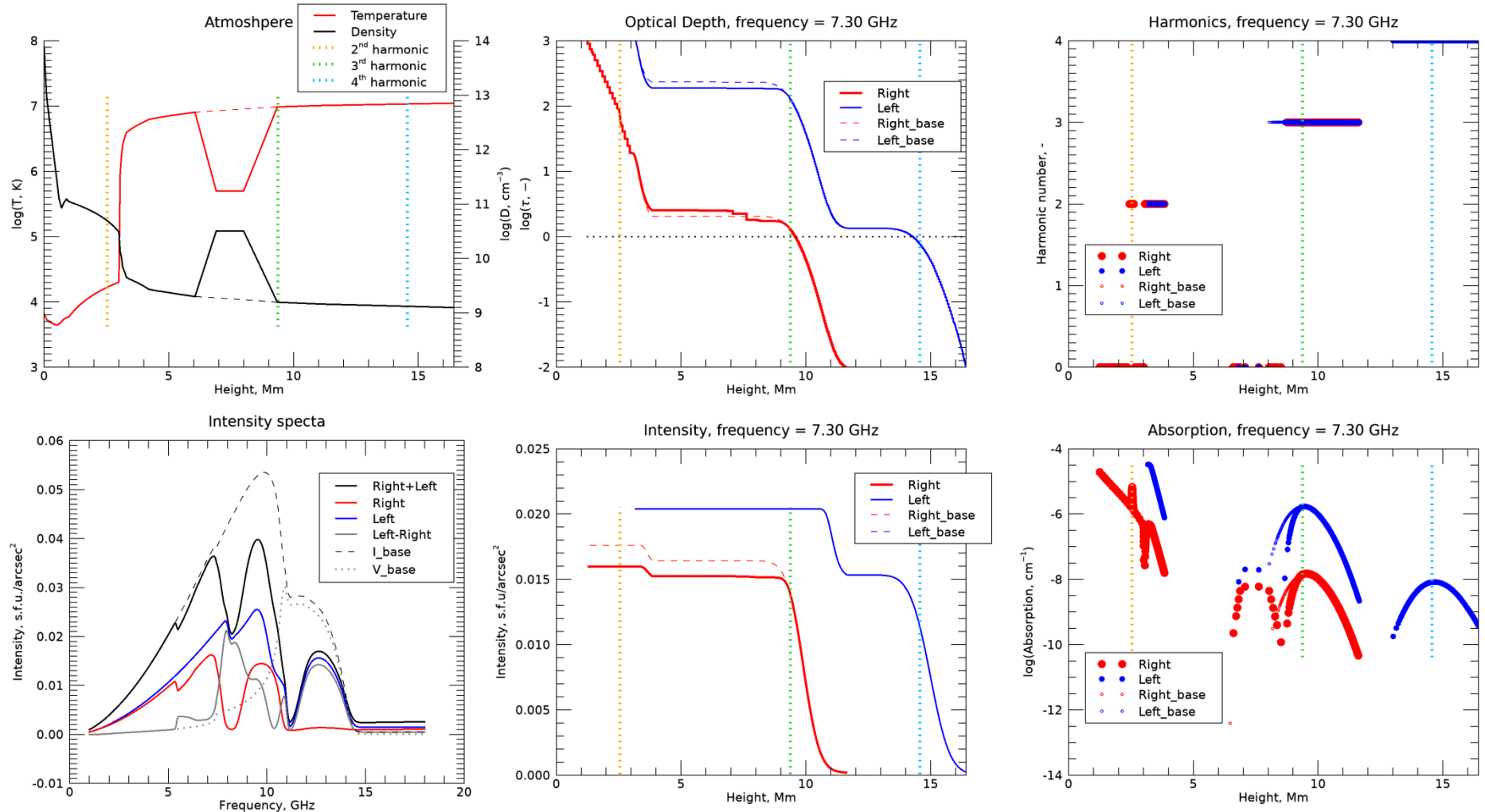
4. Узкий холодный слой с температурой 500 тыс K на высоте 4 Mm



Узкий холодный слой (около 500 тыс. K) расположен низко, на высоте 4 Мм, у основания короны. Из-за малой толщины слой накапливает небольшую оптическую толщу, поэтому заметно лишь лёгкое падение интенсивности на высокочастотном крае спектра 10–15 ГГц. На более низких частотах спектр не меняется.

Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

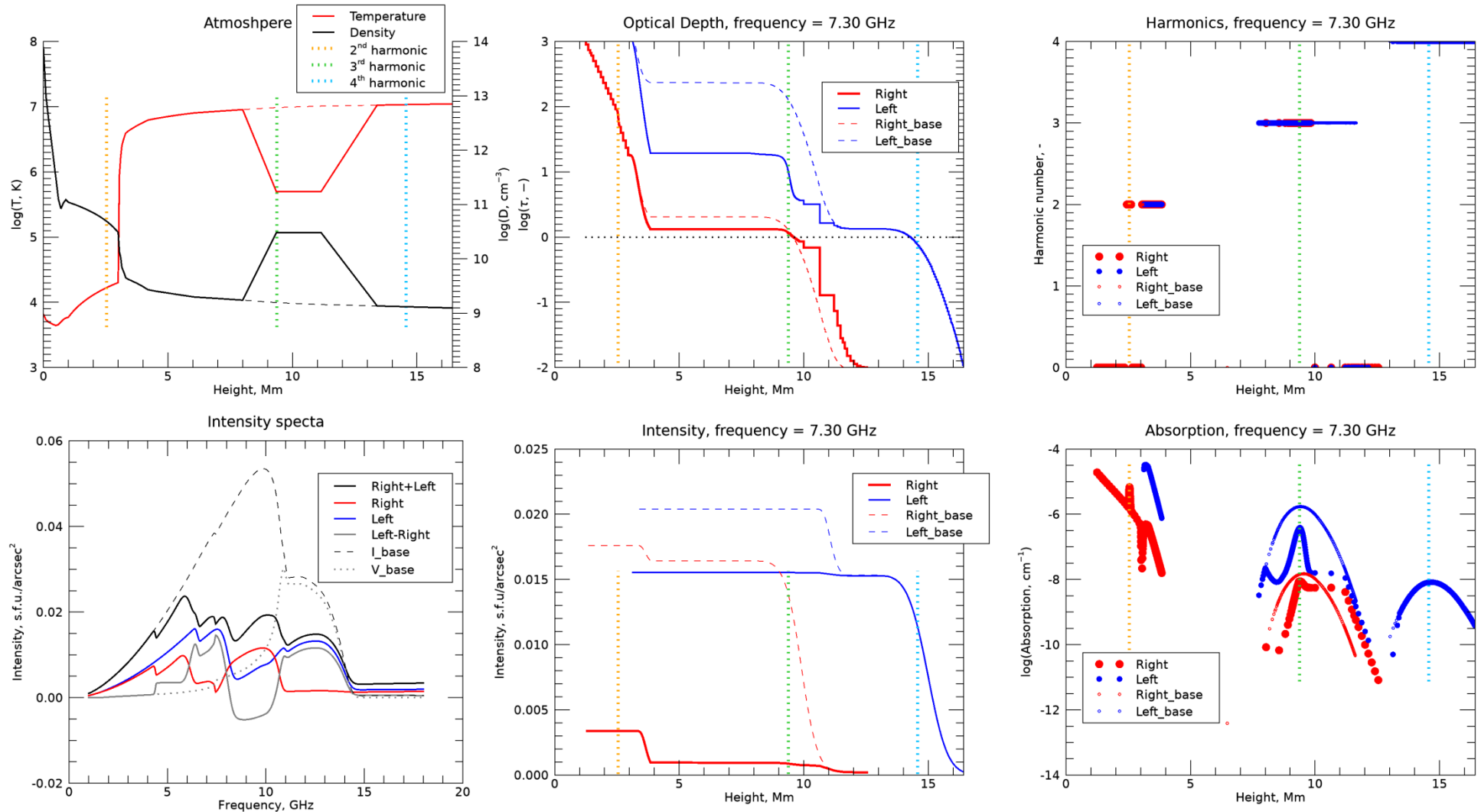
5. Холодный слой с температурой 500 тыс K на высоте 7-8 Mm



Здесь холодный слой вызывает частичное ослабление излучения на частотах выше 7 ГГц. Третий и четвёртый gyroуровни, соответствующие более низким частотам, лежат выше холодного слоя, поэтому низкочастотное излучение не затрагивается. На более высоких частотах картина сложнее: кроме уменьшения интенсивности появляется волнообразная структура спектра, связанная с тем, какой gyroуровень попадает в область холодной плазмы. Положение и глубина этих колебаний зависят от пересечения gyroуровней с холодным слоем.

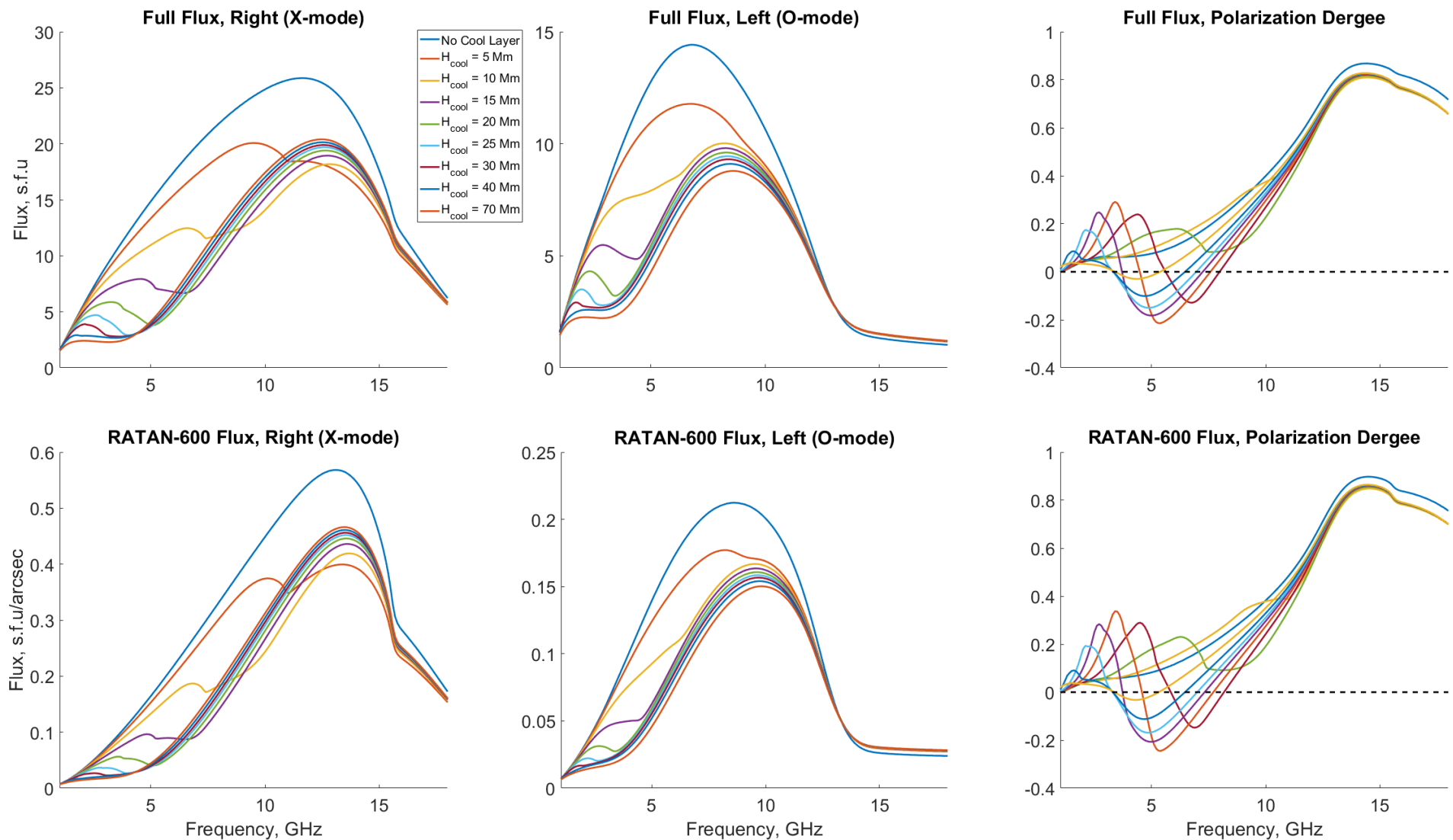
Моделирование прохождения излучения через солнечную атмосферу:

6. Холодный слой с температурой 500 тыс K на высоте 10-13 Mm



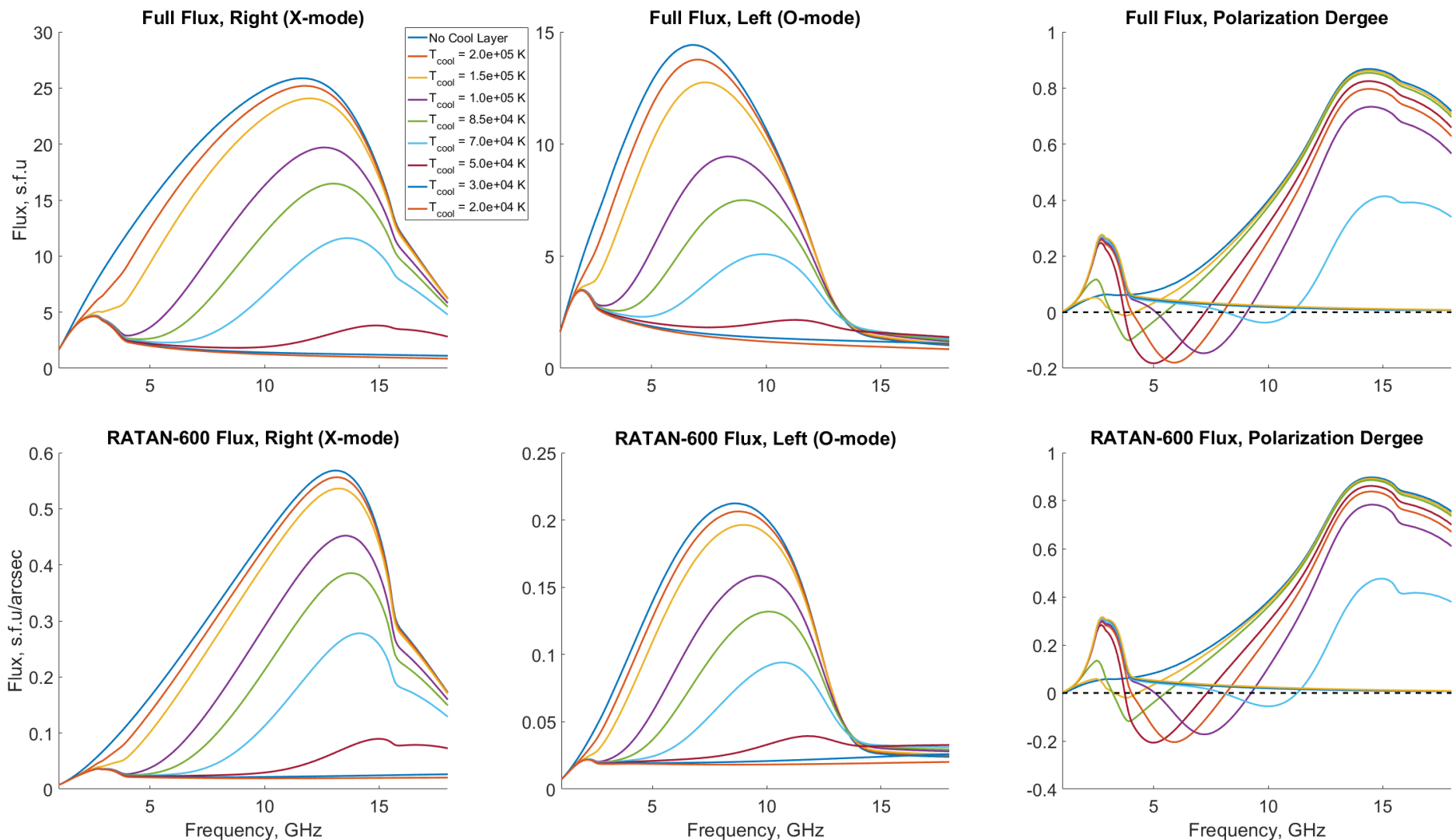
Смещение холодного слоя выше приводит к ослаблению излучения на всё более низких частотах. Увеличение его толщины уменьшает амплитуду колебаний спектра. Отметим смену знака поляризации в диапазоне 8–10 ГГц. При этом важно учитывать, что расчёт выполнен вдоль луча зрения, поэтому для более протяжённого источника эти особенности будут сглажены.

$$T_{\text{corona}} = 2.0\text{e}+06 \text{ [K]}, P = 3.0\text{e}+15 \text{ [K} \cdot \text{cm}^{-3}], \Delta H_{\text{cool}} = 0.1 \text{ [Mm]}, T_{\text{cool}} = 1.0\text{e}+05 \text{ [K]}$$



Изменение интегрального потока (для всего источника, X-моды и O-моды) и поляризации (разности мод) при разных высотах холодного слоя ($T_{\text{cool}} = 10^5 \text{ K}$, $\Delta H = 0.1 \text{ Мм}$). По мере смещения холодного слоя вниз ослабляется излучение всё более высоких частот и меняется характер поляризации (возникает двойная инверсия). Нижние панели показывают, как эти же расчёты выглядят после свёртки с диаграммой направленности антенны РАТАН-600, то есть в виде, сопоставимом с наблюдаемыми спектрами.

$$T_{\text{corona}} = 2.0 \times 10^6 \text{ [K]}, P = 3.0 \times 10^{15} \text{ [K} \cdot \text{cm}^{-3}], \Delta H_{\text{cool}} = 0.1 \text{ [Mm]}, H_{\text{cool}} = 25 \text{ [Mm]}$$



Изменение интегрального потока (для всего источника, X-моды и O-моды) и поляризации (разности мод) при разных температурах холодного слоя ($H_{\text{cool}} = 25$ Мм, $\Delta H = 0.1$ Мм). Понижение температуры холодного слоя ведёт к снижению интенсивности и изменению формы кривых поляризации. Двойная смена знака поляризации согласуется с ранними выводами Злотник [4] о том, что преобладание обыкновенной моды, может быть обусловлено наличием области с отрицательным градиентом кинетической температуры в атмосфере над пятном. Нижние панели — те же расчёты, свернутые с ДНА РАТАН-600.

Ключевые результаты и перспективы

Холодные плазменные структуры (волокна, динамические вкрапления коронального дождя, локальные конденсации) могут заметно влиять на генерацию и прохождение радиоволн. Ранее было показано, что в спектрах активных областей в дециметровом диапазоне могут наблюдаться провалы [1].

В настоящей работе использована модель Selhorst [2] как одна из немногих моделей, основанных на радионаблюдениях; завышенные температуры на корональных высотах трактуются как техническое допущение, позволяющее в первом приближении наглядно показать влияние холодных слоёв на спектральные депрессии и поляризацию. Проведенные расчёты демонстрируют, как именно холодные слои в нижней короне формируют особенности см–дм спектров.

Анализ разных конфигураций показывает, что простая однородная модель холодного слоя недостаточна для объяснения наблюдаемого спектрального разнообразия. Частичное перекрытие источника, множественность слоёв, нестационарность и локальные конденсации могут приводить к усложнению формы спектральных провалов (депрессий), изменению их ширины, смещению по частоте и появлению нескольких провалов в одном спектре. Эти особенности требуют более реалистичных моделей, учитывающих пространственные распределения температуры, плотности и магнитного поля.

Ключевые результаты и перспективы (продолжение)

Для конкретных активных областей предпочтителен подход, основанный на физически согласованных распределениях плазменных параметров, ограниченных наблюдательными данными (DEM по данным AIA, поляризационные радионаблюдения), с использованием экстраполяций магнитного поля по векторным магнитограммам HMI (при возможности — магнитогидростатические или MHD-модели). Перспективны согласованные с данными расчёты в GX Simulator (AMPP) [5], а также метод реконструкции температурного профиля по радионаблюдениям 3–18 ГГц (см. Постер [6]).

Представляет интерес вопрос о диагностике: можно ли по форме и глубине провалов восстанавливать параметры холодных слоёв? Наши результаты указывают на перспективность такого подхода, но надёжная интерпретация требует накопления статистики и согласованной обработки широкодиапазонных данных радионаблюдений с высоким частотным разрешением и точной поляриметрией, а также физически обоснованного моделирования источников излучения с учётом неоднородности, многослойности плазмы и геометрии магнитного поля.

Литература:

1. Лебедев и др., Косм. иссл., 2024, 62,6, с. 640
2. Selhorst et al., 2008, A&A, V. 488, I. 3, pp.1079-1084
3. <https://github.com/Alexey-Stupishin/AS-IDL-Library>
4. Zlotnik, 2001, Radiophys. and Quantum Electronics, V. 44, I. 1-2, pp. 53-61
5. Nita et al., Astrophys. J. Suppl. Ser., 2023, V. 267, I. 1, id.6, 24 pp.
6. А. Г. Ступишин, Г. А. Макоев, Т. И. Кальтман “К определению параметров солнечной атмосферы над активными областями по радионаблюдениям”, текущая конференция, та же секция