

«Оценка влияния парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий безоблачного неба»

Докладчик: Петров Николай Алексеевич

nial.03@mail.ru +79043156050

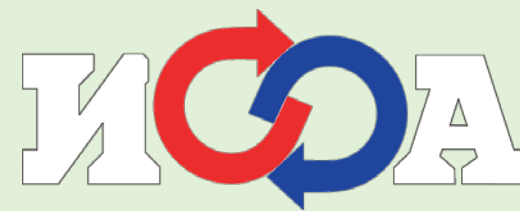


- (1) Географический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова
- (2) ФГБУ «Гидрометцентр России»



V Всероссийская конференция с международным участием
«Турбулентность, динамика атмосферы и климата»

Москва, 20 ноября 2024



Актуальность темы исследования: оценка радиационного форсинга

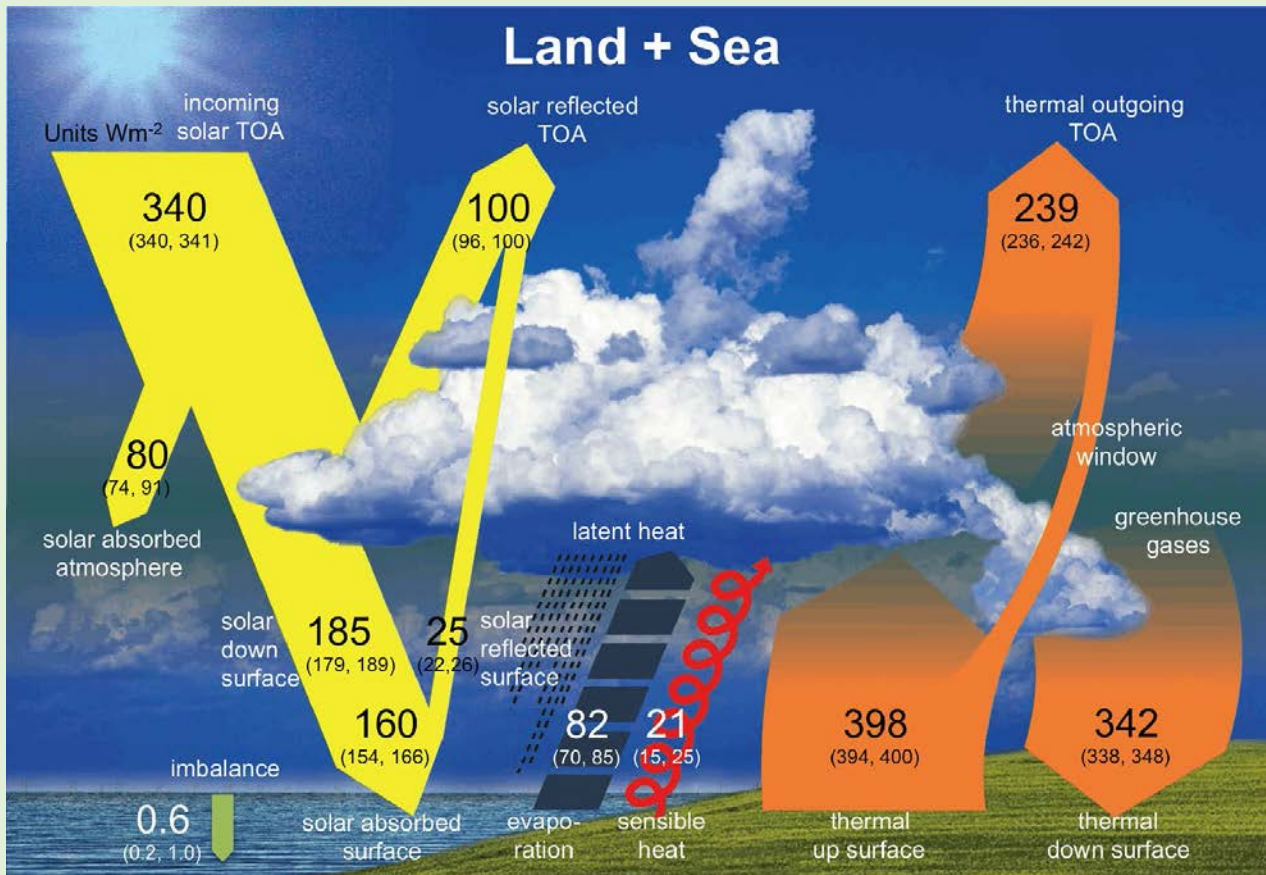
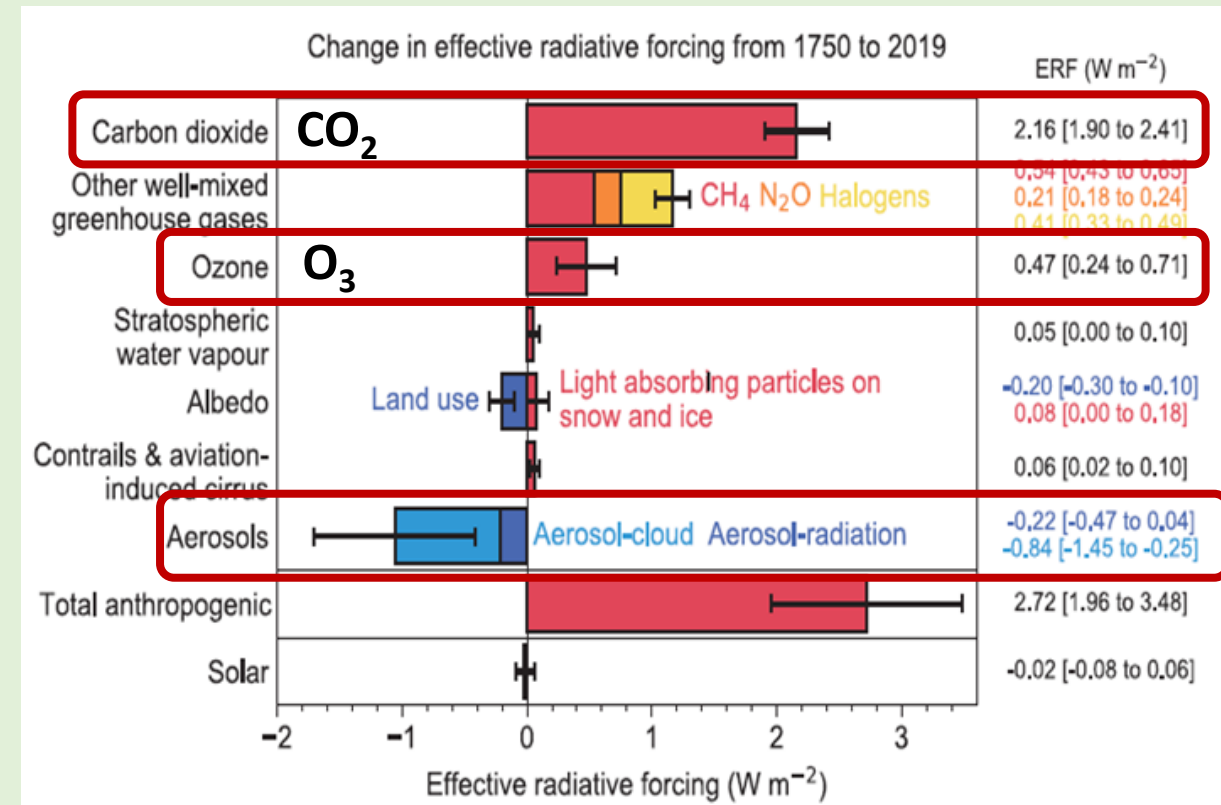


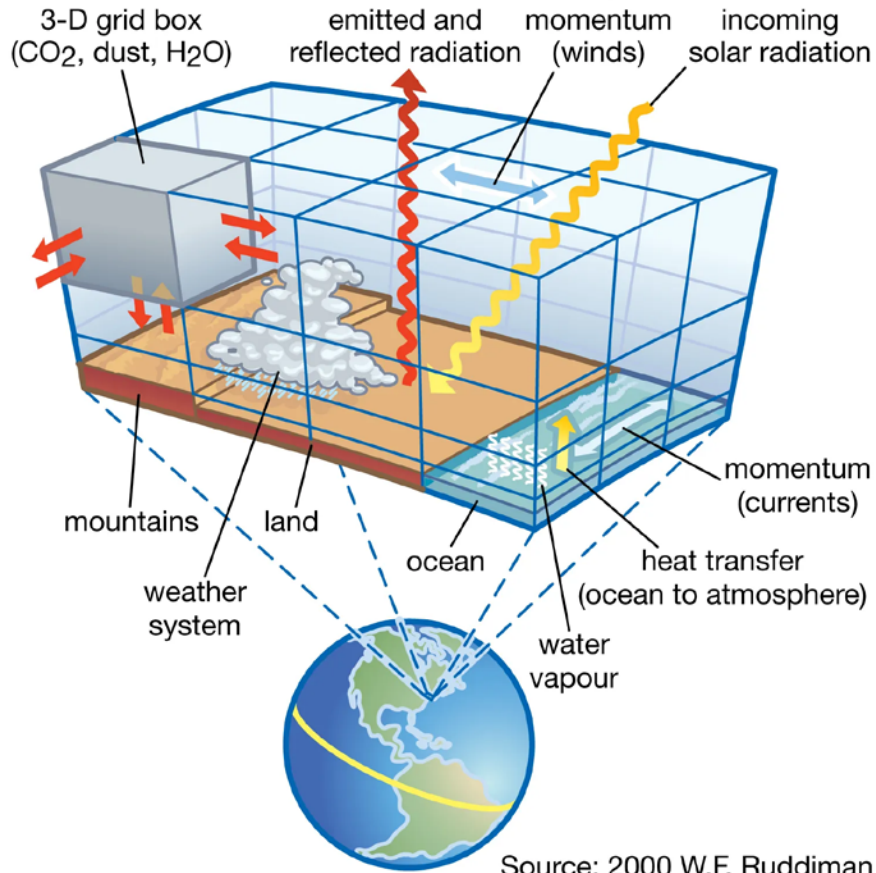
Схема энергетического баланса [IPCC 2021]



Радиационный форсинг климатически активных компонентов атмосферы [IPCC 2021]

Актуальность темы исследования: климатическое моделирование

Concept diagram of climate modeling



- ❖ В климатических моделях радиационный блок **сильно упрощён** вследствие высоких затрат по времени;
- ❖ Проведение **детального анализа** оценок радиационного воздействия в зависимости от геофизических факторов;

Цель исследования:

Региональные модельные оценки радиационного воздействия парниковых газов на примере CO_2 , O_3 и атмосферного аэрозоля на профили коротковолновой и длинноволновой радиации в зависимости от изменения геофизических параметров для Московского региона с помощью автономной модели ECRAD в условиях безоблачного неба

Различные геофизические параметры



Альбедо поверхности

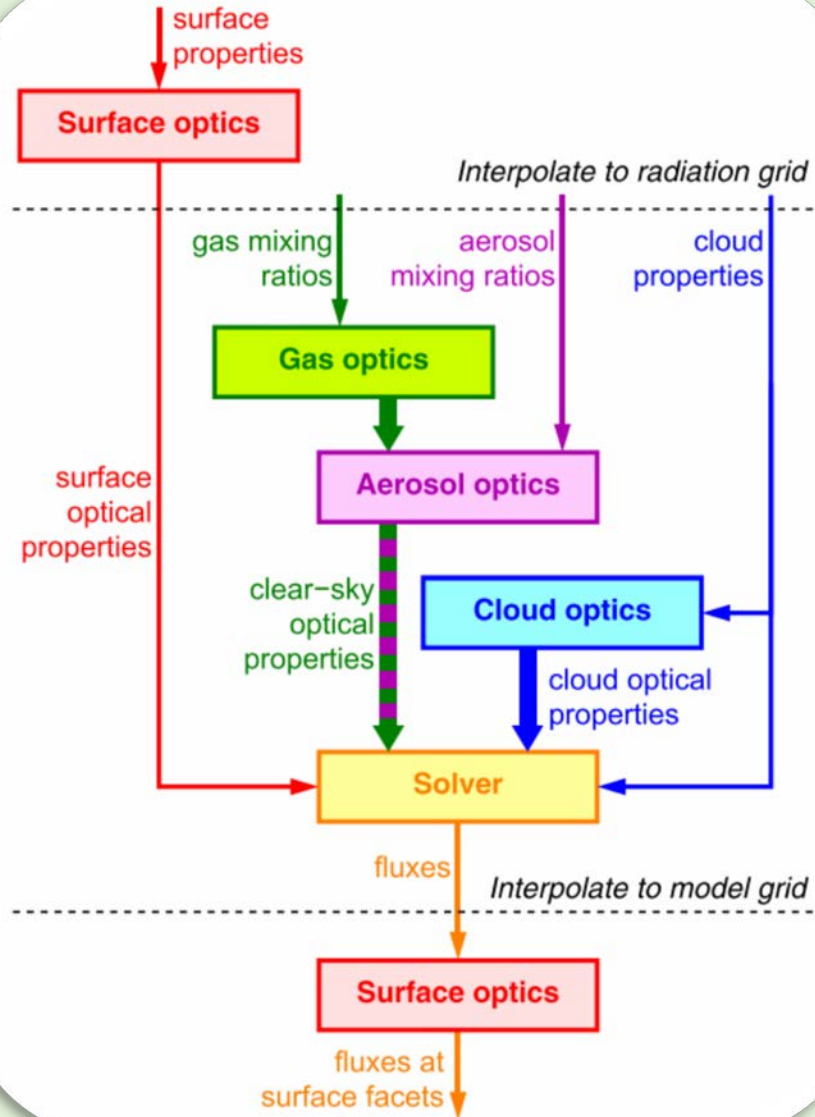
Высота солнца

Концентрация примесей

Задачи исследования:

- 1) Подготовка **матрицы входных климатических данных** для радиационных расчётов в условиях **тёплого и холодного сезонов** года при различных **высотах Солнца, альbedo поверхности и концентрации примесей**;
- 2) Проведение **детальных радиационных расчётов** с использованием адаптированной радиационной модели **ECRAD в автономном режиме**;
- 3) Расчёт **антропогенного радиационного воздействия CO_2 , O_3 и атмосферного аэрозоля** для условий Московского региона, определение особенностей вертикальных профилей;
- 4) Определение **зависимостей радиационных воздействий** как функции от **высоты Солнца и альbedo поверхности**.

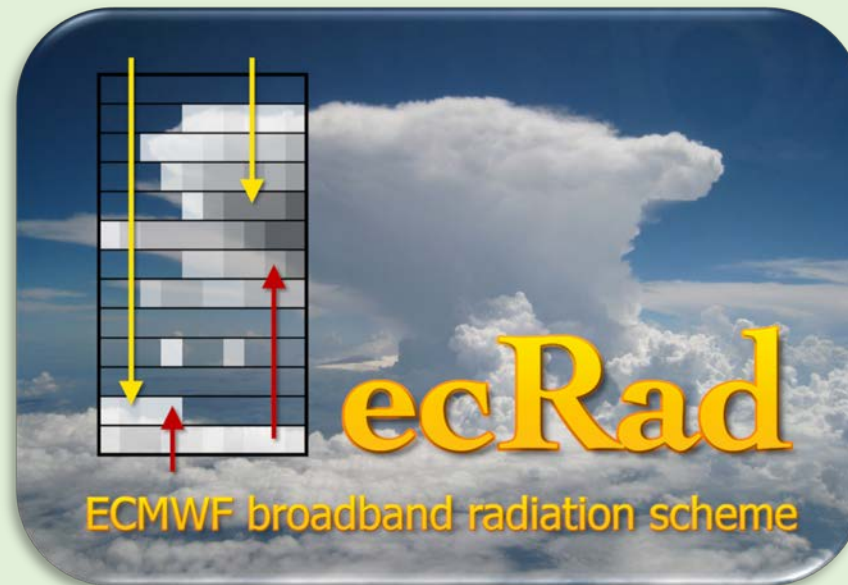
Радиационный алгоритм **ECRAD** в автономном режиме



ECRAD - один из самых совершенных алгоритмов *радиационных расчётов*

В настоящее время используется в оперативном режиме в прогностических моделях **ICON** и **IFS**.

Гибкая и настраиваемая структура с открытым программным кодом позволяет проводить **автономные** научные радиационные исследования

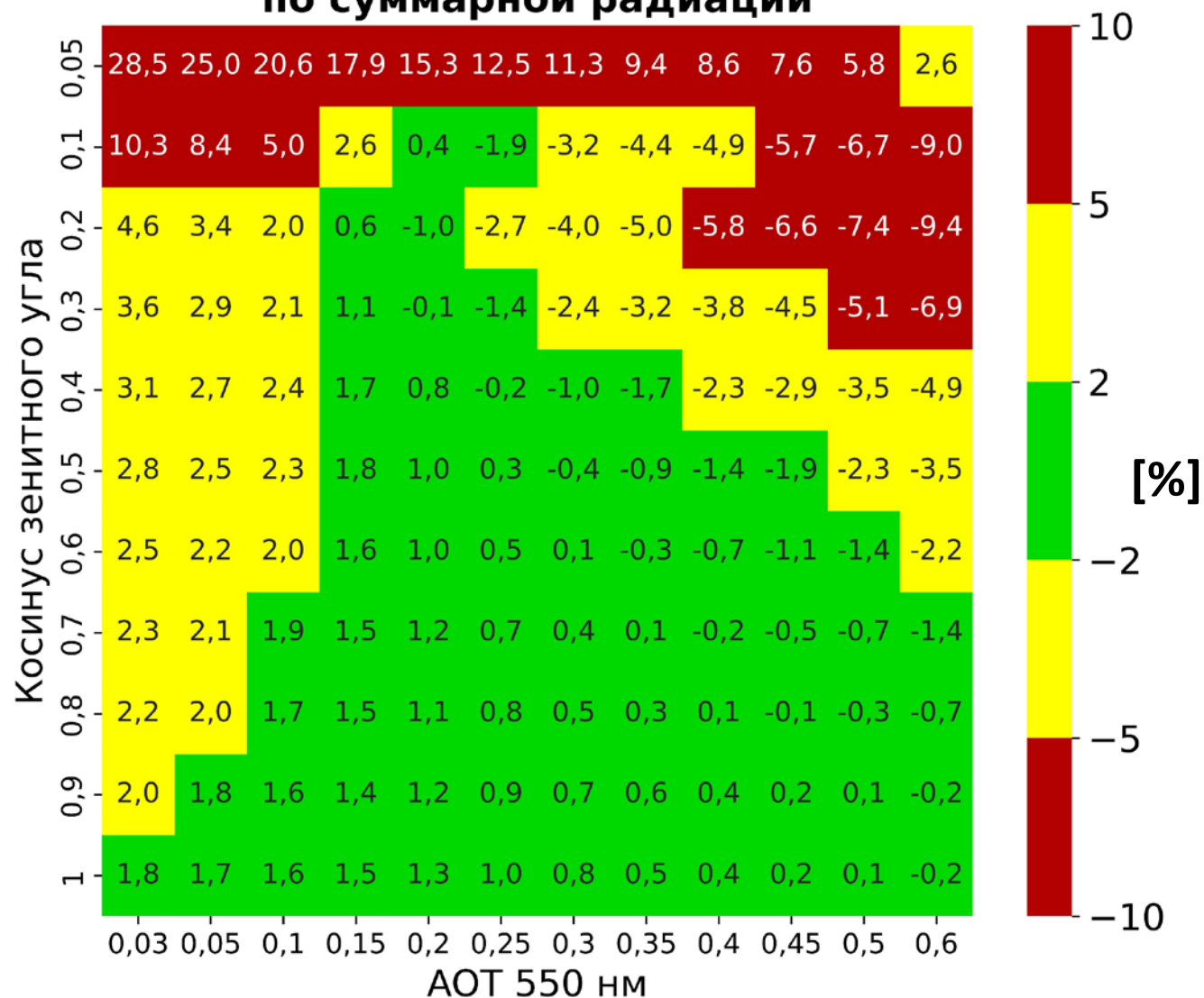


Блок-схема алгоритма ECRAD

[Hogan and Bozzo, 2018]

Результаты оценки качества радиационных расчётов ECRAD

Сравнение расчётов моделей ECRAD и Монте-Карло (Курчатовский институт, Рублёв А.Н.) по суммарной радиации



Проведено сравнение расчётов ECRAD и высокоточного метода Монте-Карло при одинаковых внешних параметрах по воспроизведению суммарной радиации

- ❖ Хорошее **согласие** для широкого диапазона высот Солнца и AOT 550 нм: $h > 6^\circ$, AOT $\in (0.05; 0.3)$
- ❖ Существенное **занижение** аэрозольных эффектов при **низких** высотах Солнца ($h > 6^\circ$) и **больших** AOT (> 0.3)

Анализируемые выходные и расчётные радиационные характеристики в ECRAD

Компоненты радиационного баланса:

1) Коротковолновый баланс:

$$B_{SW} = S_{sinh} + D - R = F_{SW}^{\downarrow} - F_{SW}^{\uparrow}$$

2) Длинноволновый баланс:

$$B_{LW} = F_{LW}^{\downarrow} - F_{LW}^{\uparrow}$$

2) Радиационный баланс:

$$B = B_{SW} + B_{LW}$$

Скорости радиационного нагрева атмосферы:

$$HR_{total} = \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{rad} = -\frac{g}{C_p} \frac{dB_{total}}{dp}$$

Изменение скоростей радиационного нагрева:

$$\Delta HR_{total} = HR_{total}^{modern} - HR_{total}^{Pre-ind}$$

Антропогенный радиационный форсинг парниковых газов и аэрозоля:

$$RF_{SW,LW,total} = B_{SW,LW,total}^{modern} - B_{SW,LW,total}^{Pre-ind}$$

«Modern» – современный период

«Pre-ind» – доиндустриальный период

LW – длинноволновый диапазон (3.08-1000 мкм)

SW – коротковолновый диапазон (0.2-12 мкм)

total – весь спектральный диапазон (0.2-1000 мкм)

Подготовка входных климатических данных для расчётов

Географический район расчётов



Метеорологическая обсерватория
МГУ (55.7° N 37.5° E)

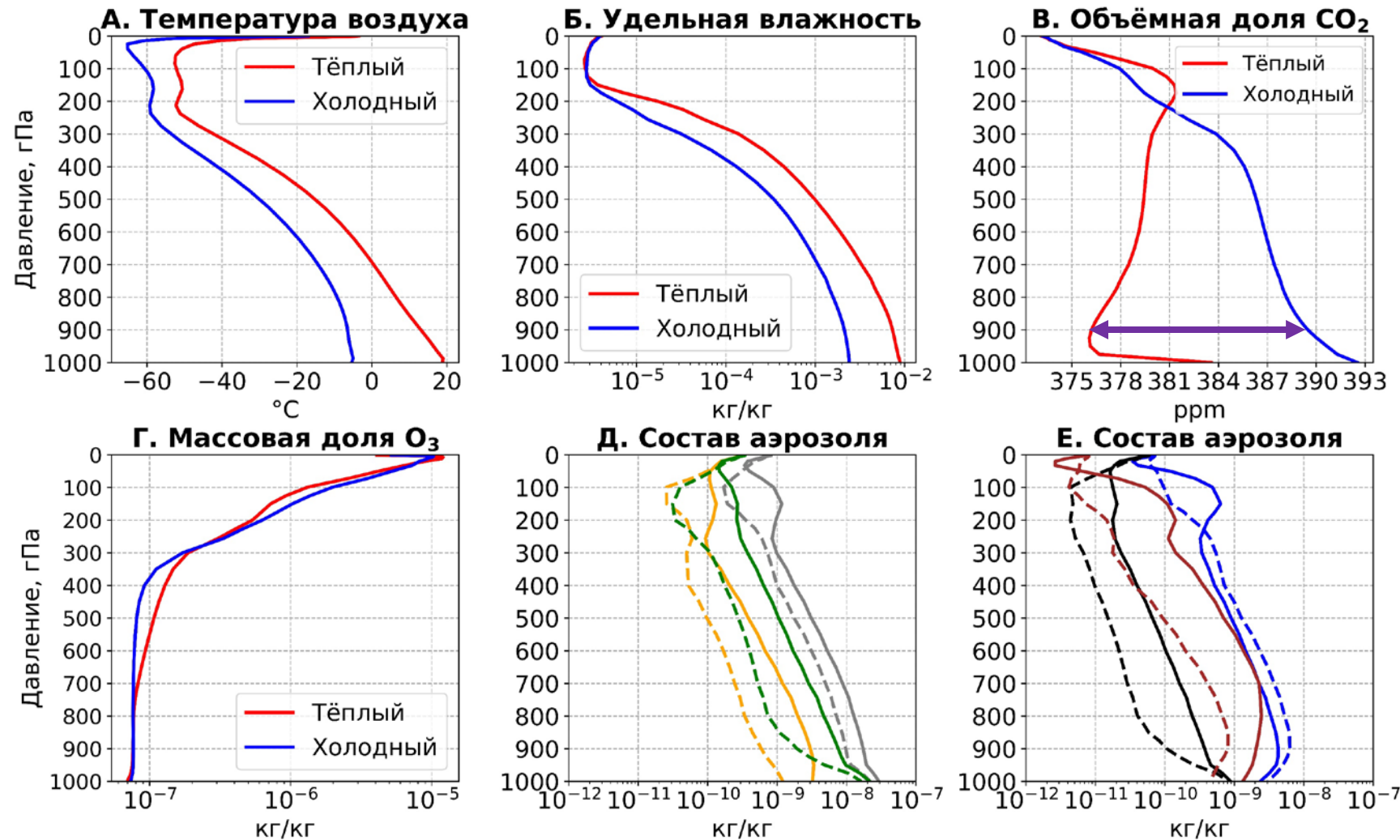
Источники данных для центра Русской равнины

- Основные *метеорологические* величины: среднемесячные данные **ERA5**
- *Атмосферный аэрозоль* – среднемесячные данные **CAMS**
- Основные *парниковые газы* – *зональные климатологические* данные **IFS Cycle 46 R1**

Осреднение данных входных величин

- Произведено осреднение величин за **20 летний период** (2003-2023)
- Отдельно для **холодного** (декабрь-март) и **тёплого** (июнь-август) периодов
- Получены вертикальные профили метеорологических и аэрозольных параметров
- Линейная интерполяция в единую сетку: **37** изобарических **уровней ERA5**

Полученный профиль входных климатических данных



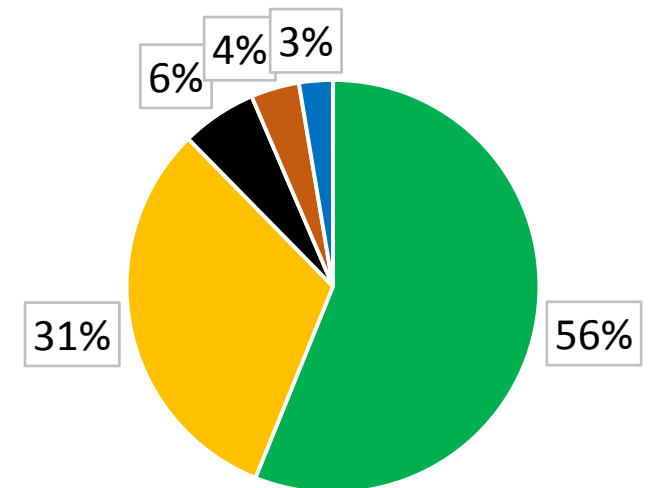
Для состава аэрозоля (Д и Е):

— Суммарный Т	— Органический Т	— Чёрный углерод Т
- - - Суммарный Х	- - - Органический Х	- - - Чёрный углерод Х
— Сульфатный Т	— Морской солевой Т	— Пылевой Т
- - - Сульфатный Х	- - - Морской солевой Х	- - - Пылевой Х

Интегральные характеристики:

Параметр	Т	Х
Влагосодержание ERA5, (кг/м ²)	25.4	7.6
Содержание озона OMI, (ед. Добсона)	321	345

Тёплый период



■ organic ■ sulfate ■ carbon
■ dust ■ sea

Формирование матрицы входных данных детальных расчётов

Альбедо поверхности

Изменение от 0.1 до 1.0 с шагом 0.1

Холодный

0.63

Тёплый

0.2

[Чубарова и др., 2014]

Высота солнца

Изменение от 2° до 60° с шагом 2°

Холодный

12.6°

Тёплый

54.9°

(Для полуденного Солнца)

Содержание примесей

CO₂: от 280 ppm до 450 ppm с шагом 1 ppm (у земли)

O₃: От 200 до 400 ед. Добсона с шагом 2 ед. Добсона

AOT 550 нм: от 0.01 до 1 с шагом 0.01

- ❖ Сохранение формы изначального профиля газов и аэрозолей;
- ❖ Вариация содержания примесей с учётом диапазона **реальной изменчивости** примесей;
- ❖ Изменение компонентного состава аэрозоля не производилось.

Длинноволновая излучательная способность

Устанавливалось постоянное значение для тёплого и холодного сезонов для всего длинноволнового спектра: 0.98
[Васильев, Тимофеев, 2003]

Внеатмосферная солнечная радиация

Холодный

1405.9

Вт/м² [Prsa et al, 2016]

Тёплый

1319.7

Учёт антропогенного изменения газово-аэрозольного состава

❖ Были проанализированы антропогенные изменения примесей с учётом их сезонной вариации и без их учёта

С учётом сезонных вариаций примесей

Сезон

Холодный

Тёплый

Период

Доинд.
(Pre-ind)

Совр.
Modern

Доинд.
(Pre-ind)

Совр.
Modern

CO₂,
ppm

280

+44 %

402



280

+37 %

383

[IPCC 2007; Чубарова Н.Е. и др., 2014]

O₃,
ед. Д.

385

-10 %

346



358

-11.5 %

321

[Измерения OMI, Austin et.al., 2013]

AOT
550 нм

0.05

+60 %

0.08

0.17

+47 %

0.25

[CAMS; AERONET; Кислов и др., 2017; Chubarova et. al., 2011]

Среднегодовые

Сезон

В среднем за год

Период

Доинд.
(Pre-ind)

Совр.
Modern

CO₂,
ppm

280

+40 %

393



[IPCC 2007, Чубарова Н.Е. и др., 2014]

O₃,
ед. Д.

365

-8.5 %

334



[IPCC 2007; Чубарова Н.Е. и др., 2014]

AOT
550 нм

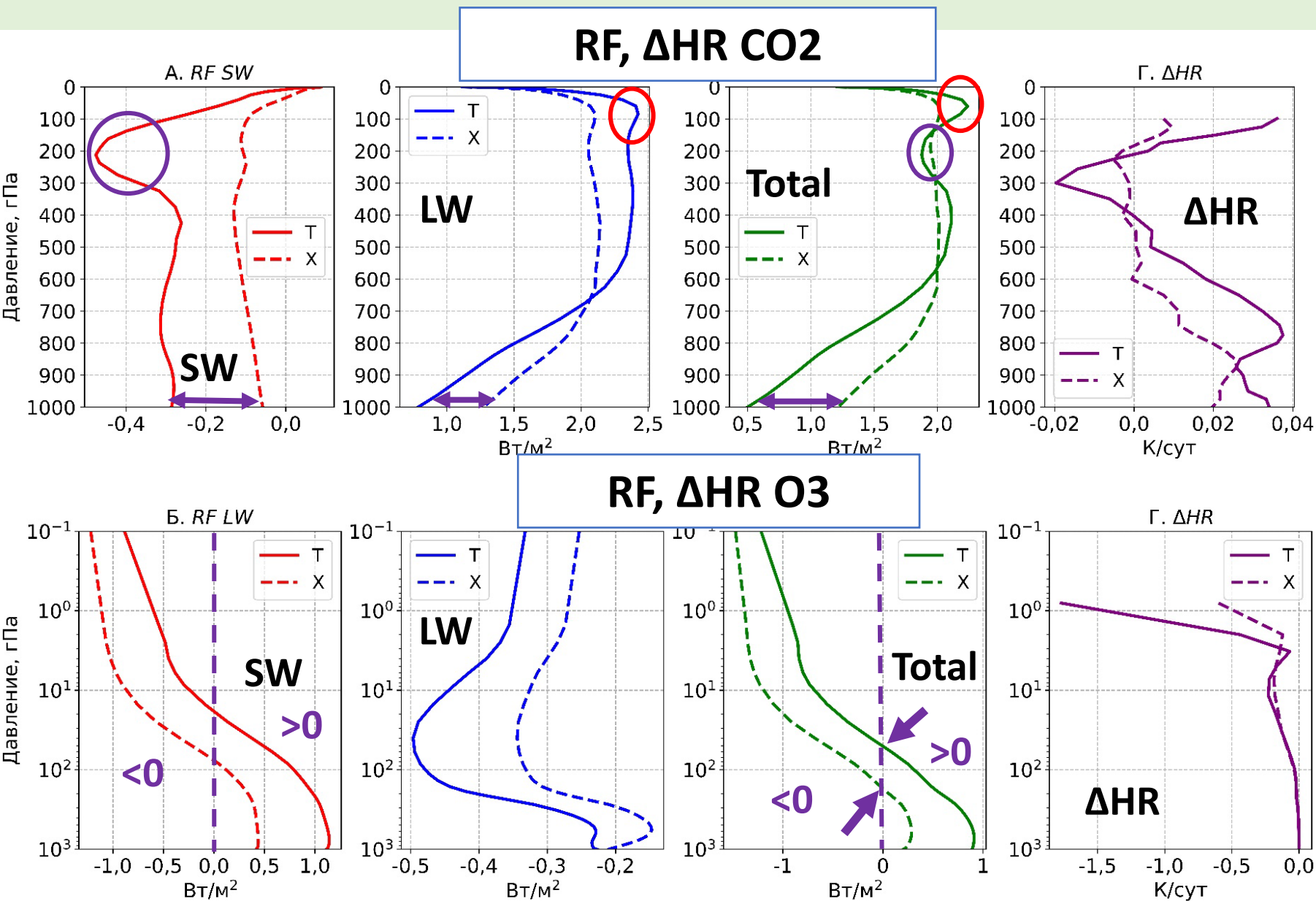
0.11

+73 %

0.19

[Чубарова Н.Е. и др., 2014; Кислов и др., 2017]

Результаты расчётов: вертикальные профили RF CO2 и O3



Холодный сезон

$$RF_{CO2} = B_{402 \text{ ppm}} - B_{280 \text{ ppm}}$$

$$RF_{O3} = B_{346 \text{ DU}} - B_{325 \text{ DU}}$$

$$h = 12.6^\circ, a = 0.63, \\ S_0 = 1405.9 \text{ Вт/м}^2$$

Тёплый сезон

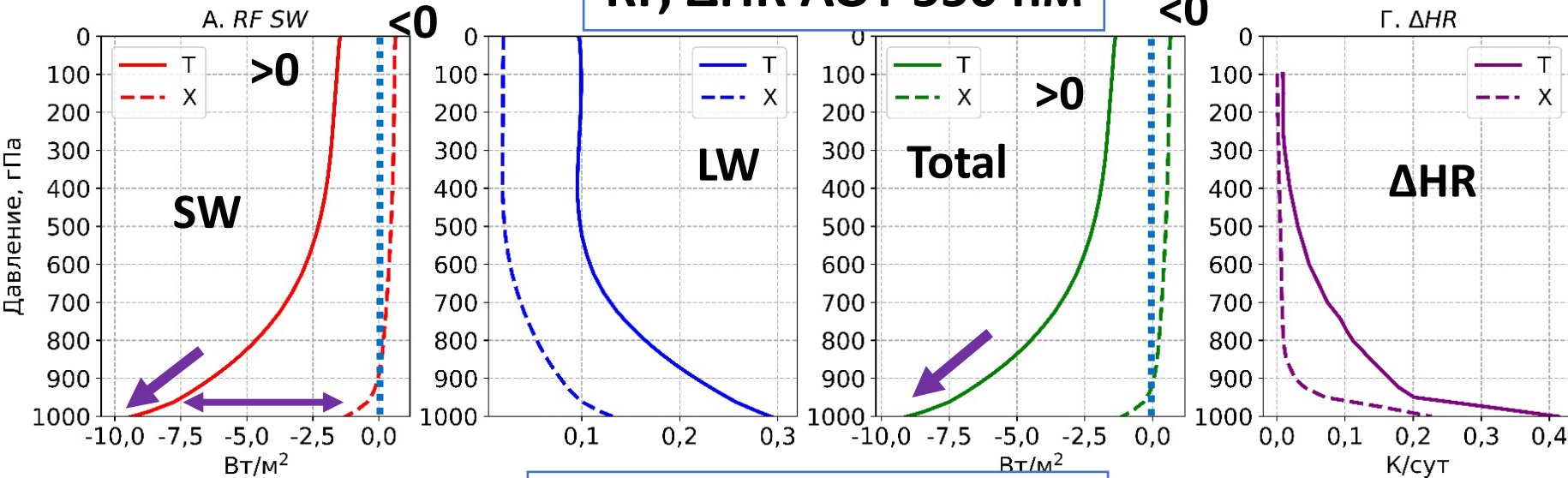
$$RF_{CO2} = B_{383 \text{ ppm}} - B_{280 \text{ ppm}}$$

$$RF_{O3} = B_{385 \text{ DU}} - B_{358 \text{ DU}}$$

$$h = 54.9^\circ, a = 0.2, \\ S_0 = 1319.7 \text{ Вт/м}^2$$

Результаты расчётов: вертикальные профили RF AOT и суммы парниковых газов и аэрозоля

RF, ΔHR AOT 550 нм



Холодный сезон

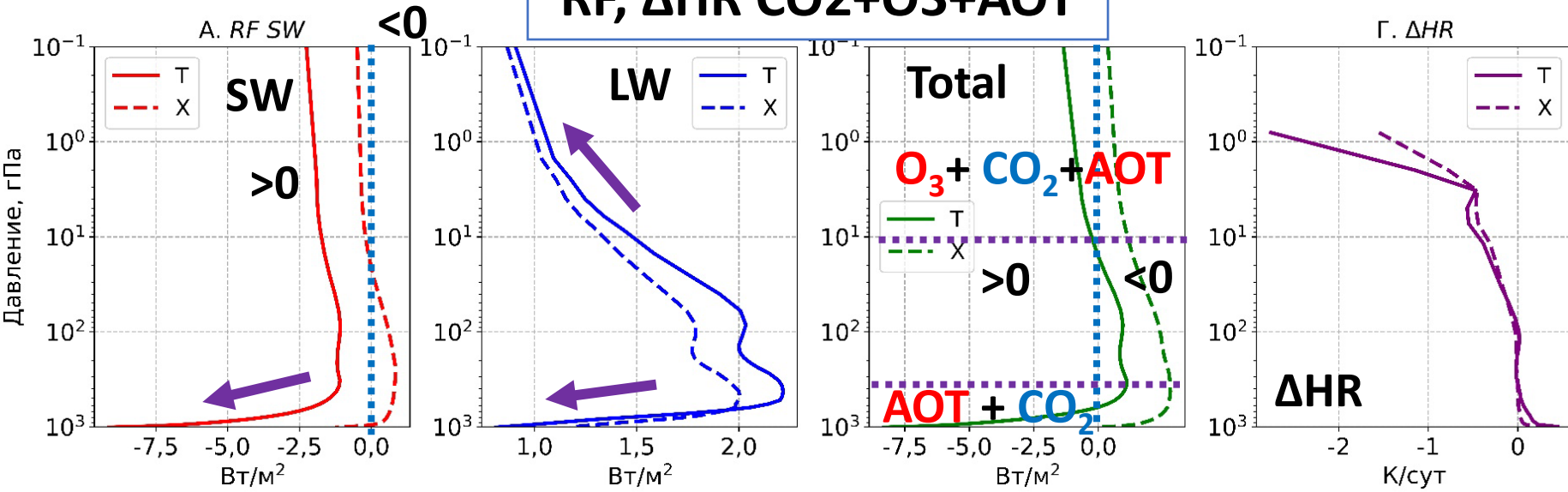
$$RF_{AOT} = B_{0.08} - B_{0.05}$$

$$RF_{\Sigma} = RF_{CO_2} + RF_{O_3} + RF_{AOT}$$

$$h = 12.6^\circ, a = 0.63,$$

$$S_0 = 1405.9 \text{ Вт/м}^2$$

RF, ΔHR CO2+O3+AOT



Тёплый сезон

$$RF_{AOT} = B_{0.25} - B_{0.17}$$

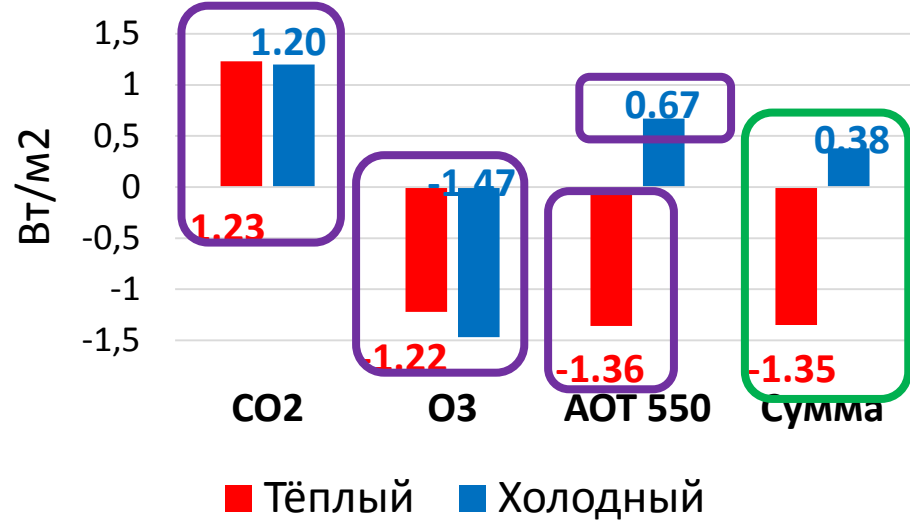
$$RF_{\Sigma} = RF_{CO_2} + RF_{O_3} + RF_{AOT}$$

$$h = 54.9^\circ, a = 0.2,$$

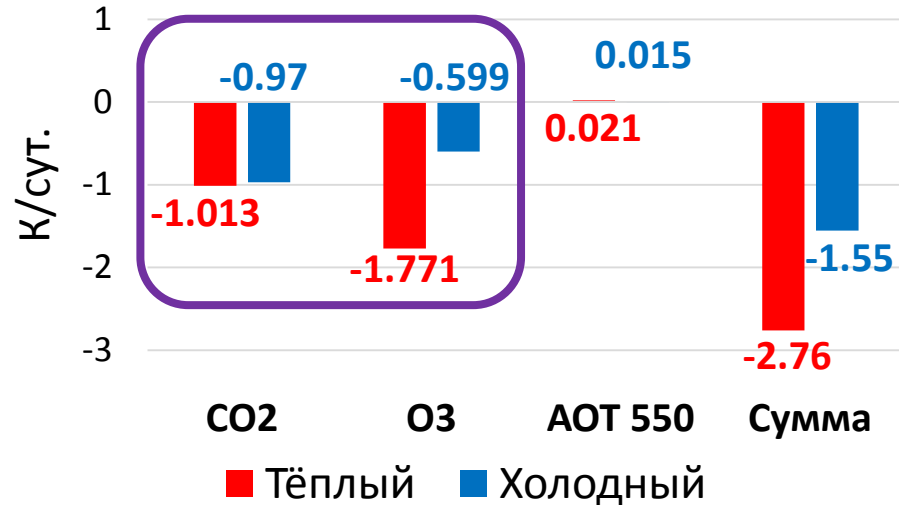
$$S_0 = 1319.7 \text{ Вт/м}^2$$

Результаты расчётов: сравнение RF на ВГА и НГА

RF Total ВГА



ΔHR ВГА

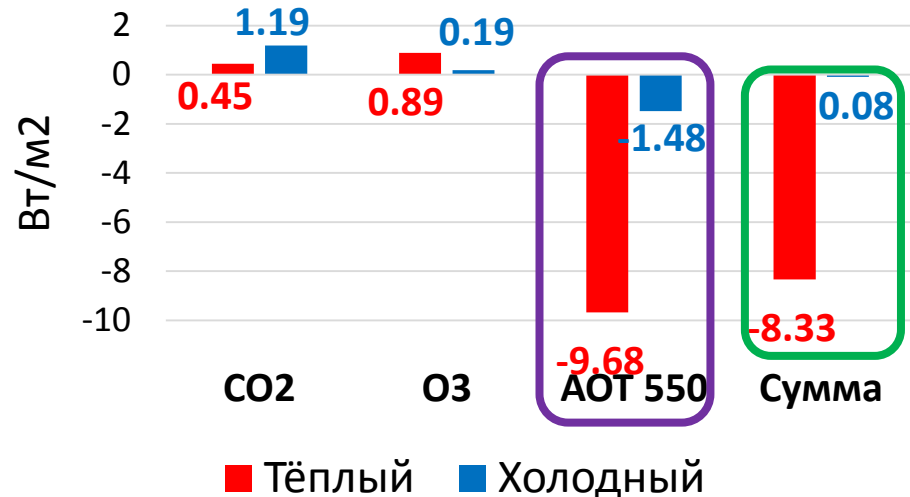


Результаты:

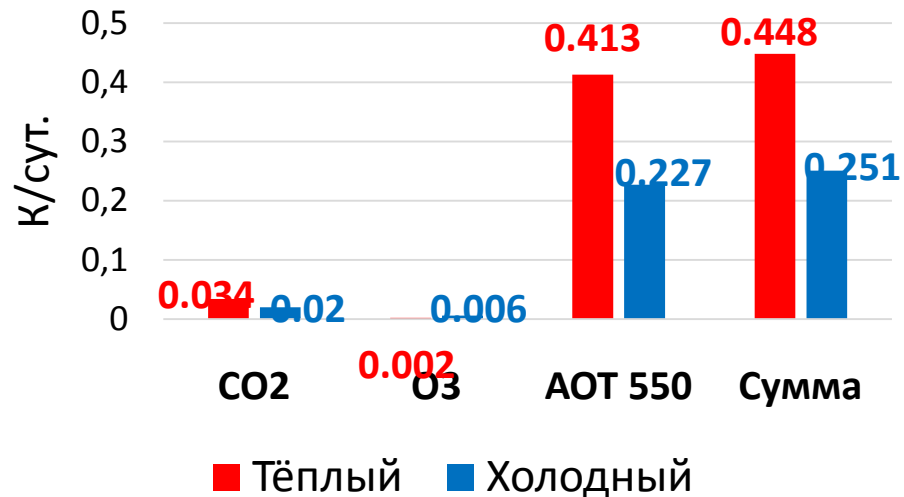
На ВГА

- $RF\ CO_2$, O_3 и AOT сопоставим в тёплый период
- Радиационное выхолаживание за счёт $RF\ O_3$ и CO_2 .

RF Total НГА



ΔHR НГА

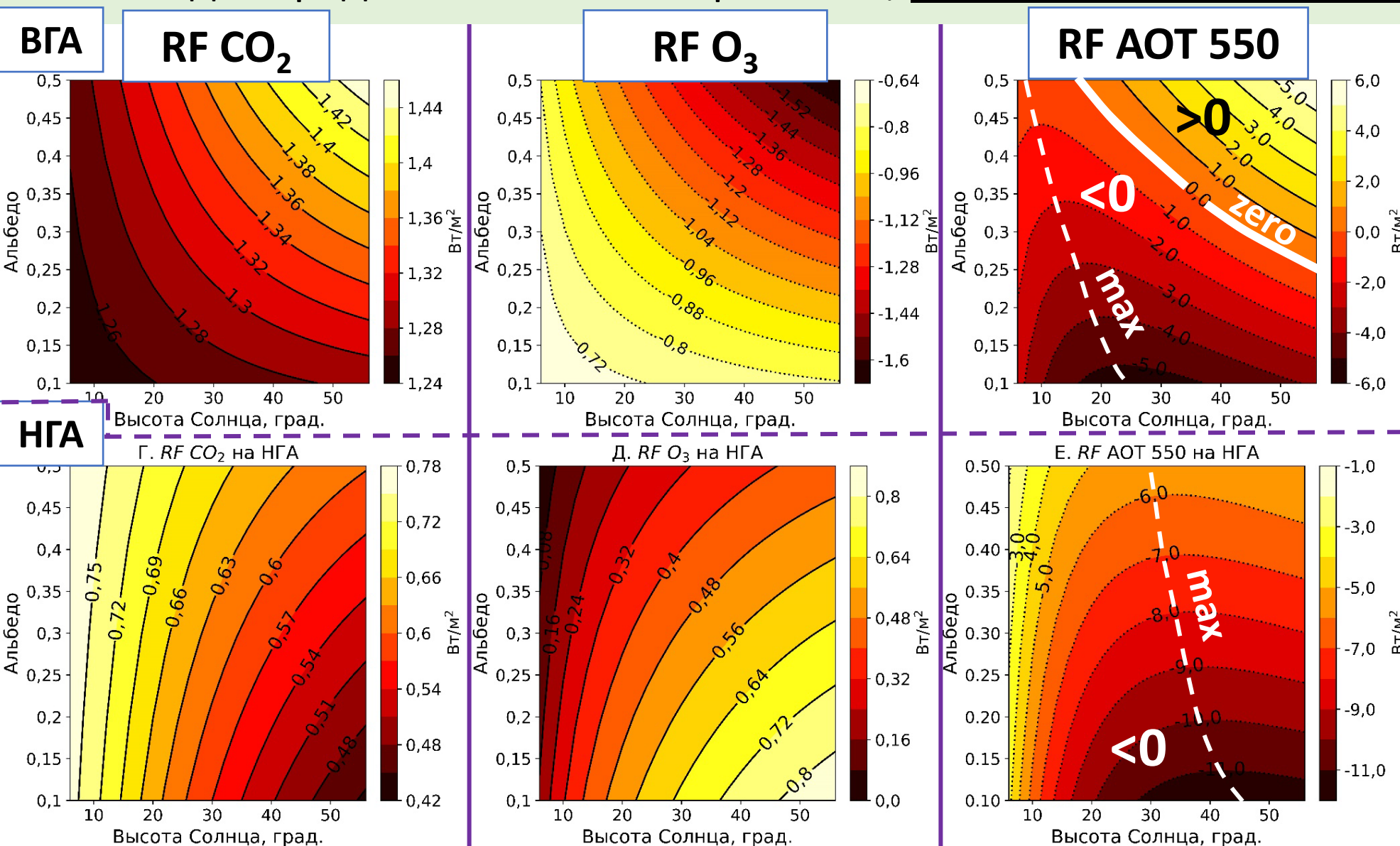


На НГА

- Главный фактор RF и ΔHR - аэрозоль: около 92 % вклада в ΔHR ;
- $RF\ CO_2$ выше в холодный период;
- $RF\ O_3$ на НГА – за счёт поглощения УФ радиации.

Зависимость RF total (SW+LW) от высоты Солнца и альбеда поверхности

Расчёт для средних изменений примесей, без учёта сезонного хода в тёплый период



Результаты:

На ВГА

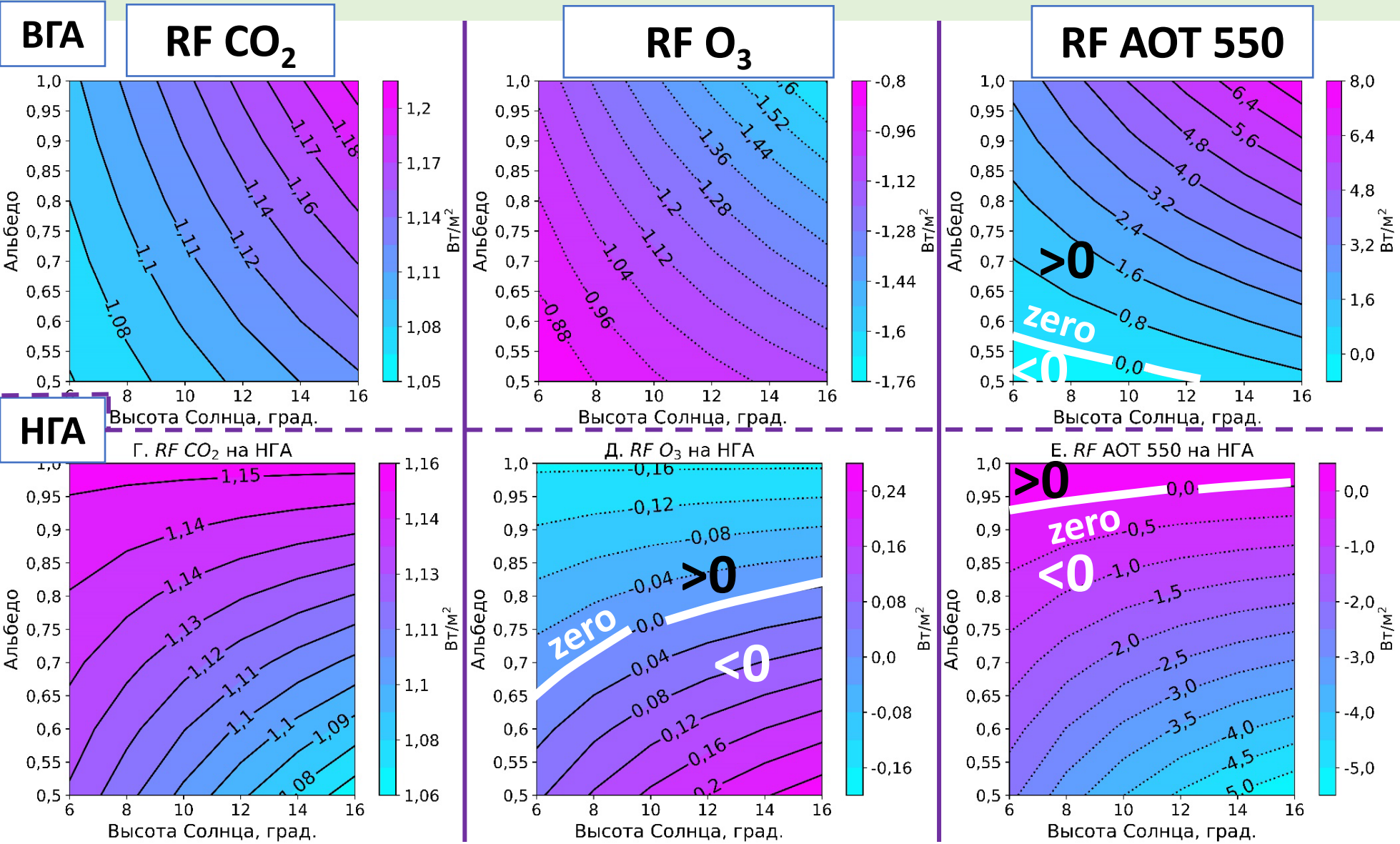
- Нелинейная зависимость от высоты солнца и альбеда
- Для аэрозоля - линия смена знака RF

На НГА

- Нелинейная зависимость от высоты солнца и альбеда
- Точка минимума RF АОТ для высоты Солнца

Зависимость RF total (SW+LW) от высоты Солнца и альбеда поверхности

Расчёт для средних изменений примесей, без учёта сезонного хода в холодный период



Результаты:

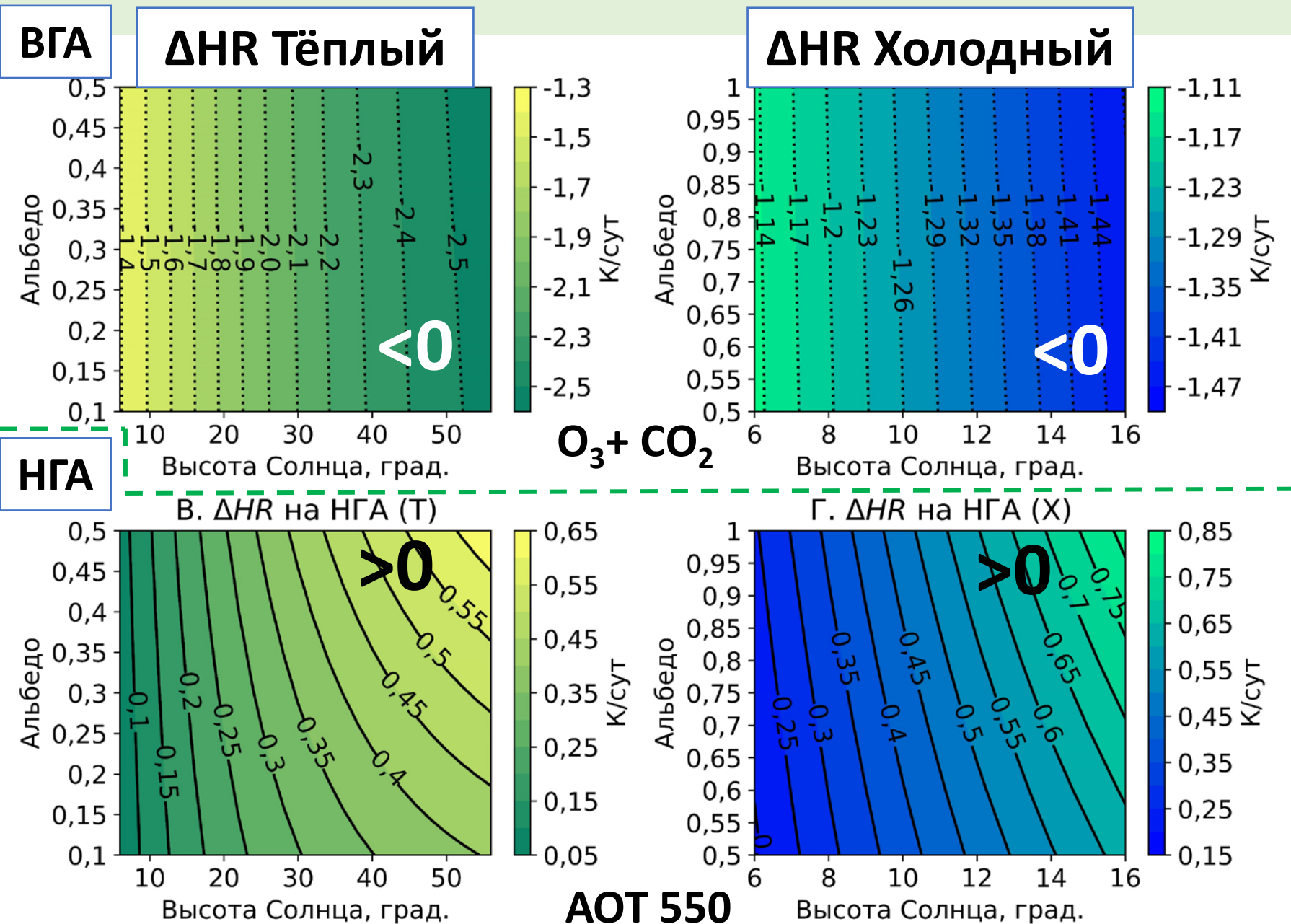
На BGA

- Сопоставимое влияние CO_2 и O_3
- Для AOT – положительные значения RF

На HGA

- Сопоставимое влияние CO_2 и AOT при низких h и высоких альбеда
- Для RF O_3 низкие значения, переход через 0

Зависимость ΔHR total (SW+LW) от высоты Солнца и альбедо поверхности



Результаты:

На ВГА

- Альбедо почти не влияет на ΔHR при разных h
- Сильное увеличение рад. выхолаживания стратосферы
- Роль CO_2 и O_3

На НГА

- Роль альбедо увеличивается с высотой Солнца
- Увеличение радиационного нагрева г.о. за счёт аэрозольного воздействия
- Влияние на ΔHR сильнее в холодный период

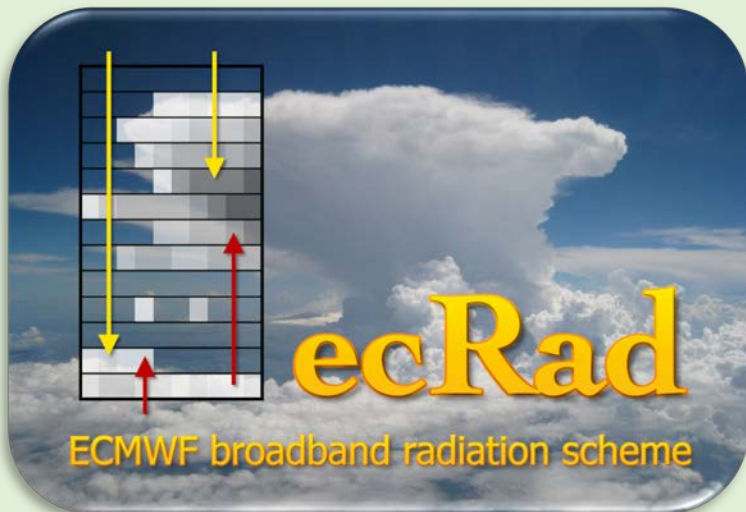
Основные выводы и результаты работы

- ❖ 1. Рассчитаны **базы данных** антропогенных **RF** и **ΔHR** для **CO₂**, **O₃**, **AOT** при различных **высотах Солнца**, **альbedo поверхности** для **Московского региона** в условиях **безоблачного** неба для **холодного** и **тёплого** сезонов;
- ❖ 2. При детальном расчёте получено:
 - **RF CO₂**, **O₃** и **AOT 550** сопоставимы по величине на ВГА, при этом для холодного сезона характерно положительное значение **RF AOT 550 (0.4 Вт/м²)** из-за влияния альbedo;
 - **RF CO₂** для НГА выше в зимний период (**1.2 Вт/м²**) и сопоставимо по величине с **RF AOT 550 (-1.5 Вт/м²)** из-за низкой высоты Солнца;
 - **Главный фактор** антропогенного изменения радиационного баланса в тёплый период на НГА – **AOT 550 нм (-9.7 Вт/м²)**, парниковый эффект **O₃ (0.9 Вт/м²)** больше воздействия **CO₂ (0.5 Вт/м²)**;
- ❖ 3. Расчётные данные могут служить **основой** для **тестирования глобальных климатических моделей**.

«Оценка влияния парниковых газов и атмосферного аэрозоля на коротковолновую и длинноволновую радиацию для условий безоблачного неба»

Работа выполнена при поддержке гранта **РНФ № 19-77-30004-П**

Петров Николай (nial.03@mail.ru, +79043156050)



Список литературы и источников

Описание переноса радиации в атмосфере

Общее уравнение переноса радиации в атмосфере в плоскопараллельном приближении

$$\pm \mu \frac{dI_{\lambda}^{\pm}(\tau, \mu, \varphi)}{d\tau_{\lambda}} = I_{\lambda}^{\pm}(\tau, \mu, \varphi) - J_{\lambda}^{\pm}(\tau, \mu, \varphi)$$

Интегро-дифференциальная форма уравнения переноса

$$\mu \frac{dI(\tau, \vec{\Omega})}{d\tau} = I(\tau, \vec{\Omega}) - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} \int_{4\pi} I(\tau, \vec{\Omega}') P(\vec{\Omega}; \vec{\Omega}') d\vec{\Omega}' - \frac{\tilde{\omega}}{4\pi} S_{\Theta} P(\vec{\Omega}; -\vec{\Omega}_0) e^{-\frac{\tau}{\mu_0}} + (1 - \tilde{\omega}) B[T(\tau)]$$

$I_{\lambda}^{\pm}$ - интенсивность излучения, $J_{\lambda}^{\pm}$ - функция источника, S_{Θ} - прямая радиация, $B[T(\tau)]$ - функция Планка, P - индикатриса рассеяния, τ_{λ} - оптическая толщина, $\tilde{\omega}$ - альbedo однократного рассеяния, μ - косинус зенитного угла, φ - азимутальный угол, $\vec{\Omega} = (\mu, \varphi)$

Общая задача радиационного алгоритма по [Hogan, Shonk, 2020]:

$$F_t^{\pm} = \frac{1}{TS} \int_0^T \iint_S \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} I(z, \Omega, x, \lambda, t) \mu d\Omega d\lambda dS' dt$$

Вычисление осреднённых по времени (T) и площади ячейки (S) плотностей радиационных потоков ($F_t^{\pm}$)