



# Результаты сравнений сетевого озонового спектрофотометра Брюэра ИФА РАН с рабочим эталоном Росгидромета спектрофотометром Добсона

Савиных В. В.<sup>1</sup>, Соломатникова А. А.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

<sup>2</sup> Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Войкова, Санкт-Петербург

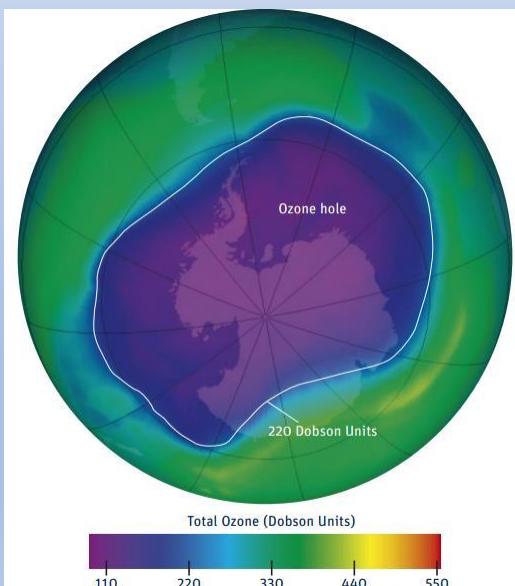
XXIII Международная Конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

10 – 14 ноября 2025 года, Москва

[amita@ifaran.ru](mailto:amita@ifaran.ru), [pulsin@mail.ru](mailto:pulsin@mail.ru)

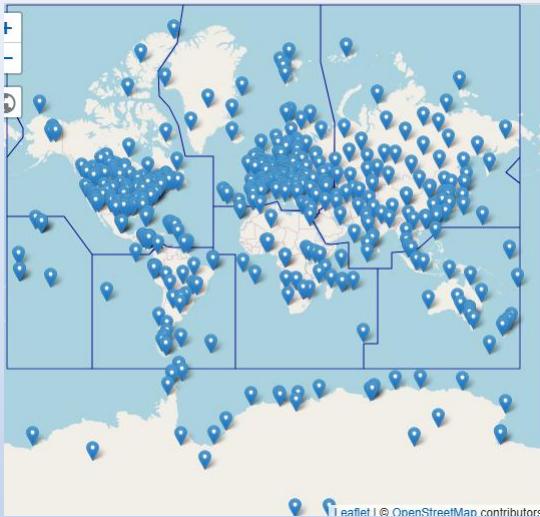


Озоновый слой Земли



Озоновая дыра  
над Антарктидой

- Озон ( $O_3$ ) – атмосферный газ, который участвует во многих фотохимических реакциях.
- $O_3$  находится на высоте от 10 до 40 км и интенсивно поглощает поступающую ультрафиолетовую (УФ) солнечную радиацию.
- Уменьшение содержания  $O_3$  в стратосфере вызывает изменение климата (IPCC, 2014).
- Ограничение выбросов озоноразрушающих веществ (OPB) ведёт к постепенному восстановлению озонового слоя (WMO, 2022).
- На содержание  $O_3$  влияют циркуляционные факторы, уровень солнечной активности и вулканические выбросы (Savinykh *et al.*, 2021).

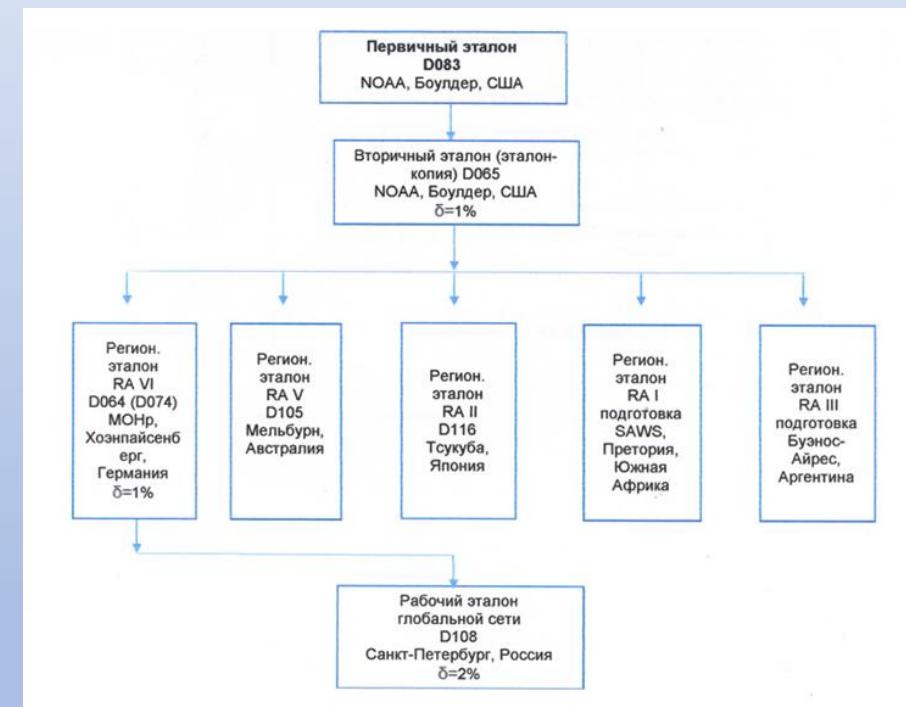


- Глобальный мониторинг общего содержания озона (ОС  $O_3$ ) обеспечивается за счет сети станций ГСА (UNEP, 2018).
- Сеть оснащена спектрофотометрами (с/ф) Добсона и Брюэра, фильтровыми озонометрами и зенитными спектрометрами.

## Озонометрические станции 1953 – 2025 гг.



Интеркалибровка с/ф Добсона и Брюера



Шкала мировой озонометрической сети передается методом сличений

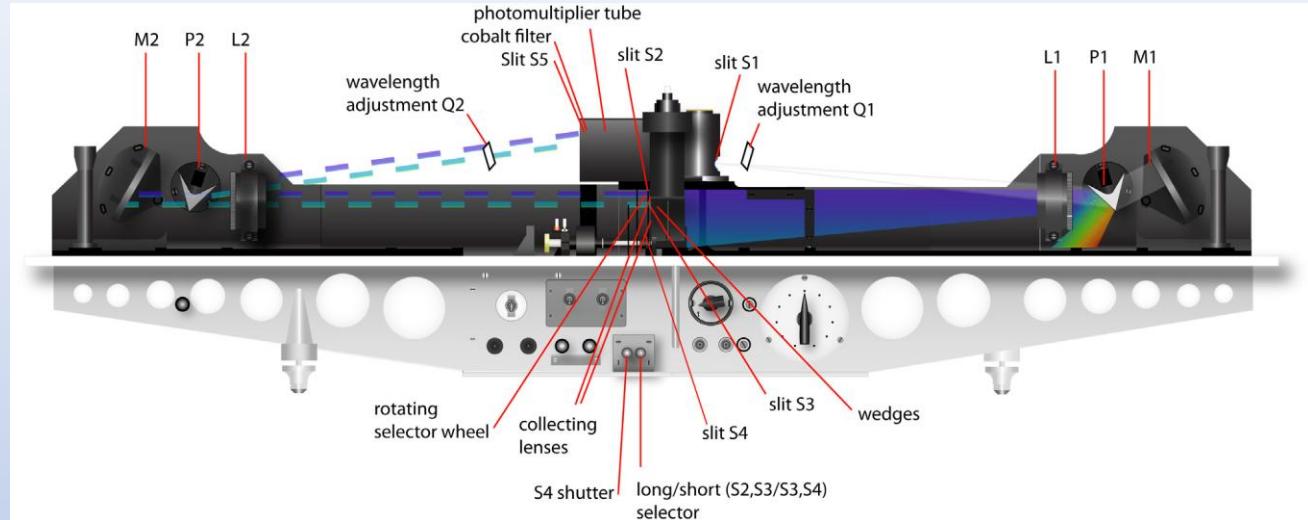
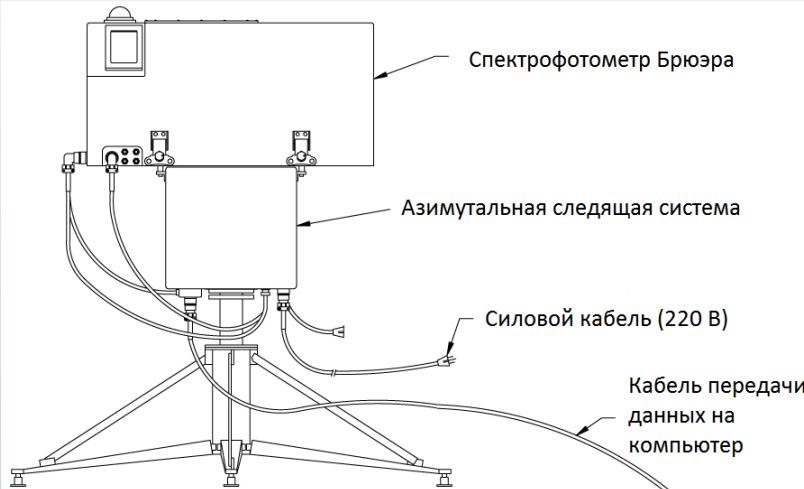


Схема с/ф Добсона



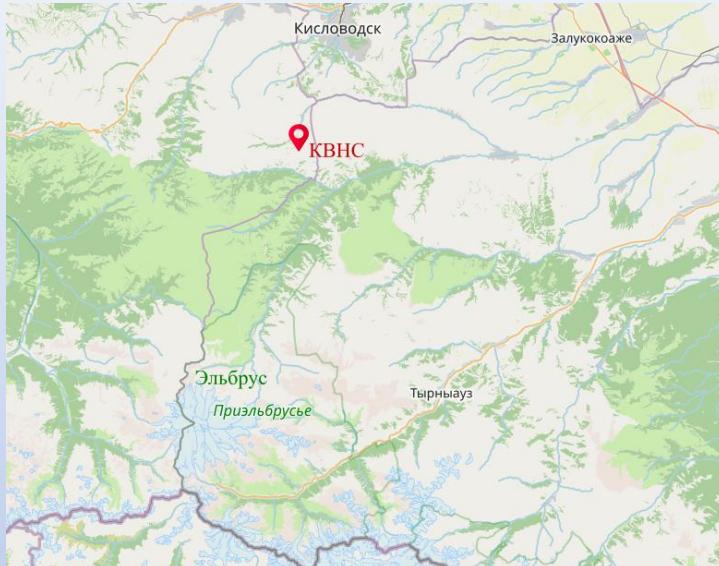
С/ф Добсона #108 ГГО

- С/ф Добсона – опорный прибор мировой сети для наблюдений  $O_3$ . Он измеряет прямое и рассеянное УФ излучение на определённых парах длин волн.
- ОС  $O_3$  определяется выравниванием интенсивности потоков радиации на паре длин волн с сильным и слабым поглощением путём введения клина для имитации оптической плотности разных уровней  $O_3$ .
- Добсон также может использоваться для измерения высотных профилей  $O_3$  в атмосфере.



- С/ф Брюэра измеряет спектральный состав прямой, рассеянной и суммарной УФ радиации.
- ОС О<sub>3</sub> определяется методом дифференциального поглощения в УФ-Б области спектра.
- Брюэр помещён в атмосферостойкий корпус, имеет следящую систему и предназначен для наблюдений при любых погодных условиях.
- Около 80 станций в 40 странах оснащены более 200 с/ф Брюэра разных типов (MkII, MkIII и MkIV).
- Сетевые с/ф Брюэра регулярно калибруются по мобильному эталону Brewer MkII #017 (Канада).

# Пункт измерений



ВНС ИФА РАН



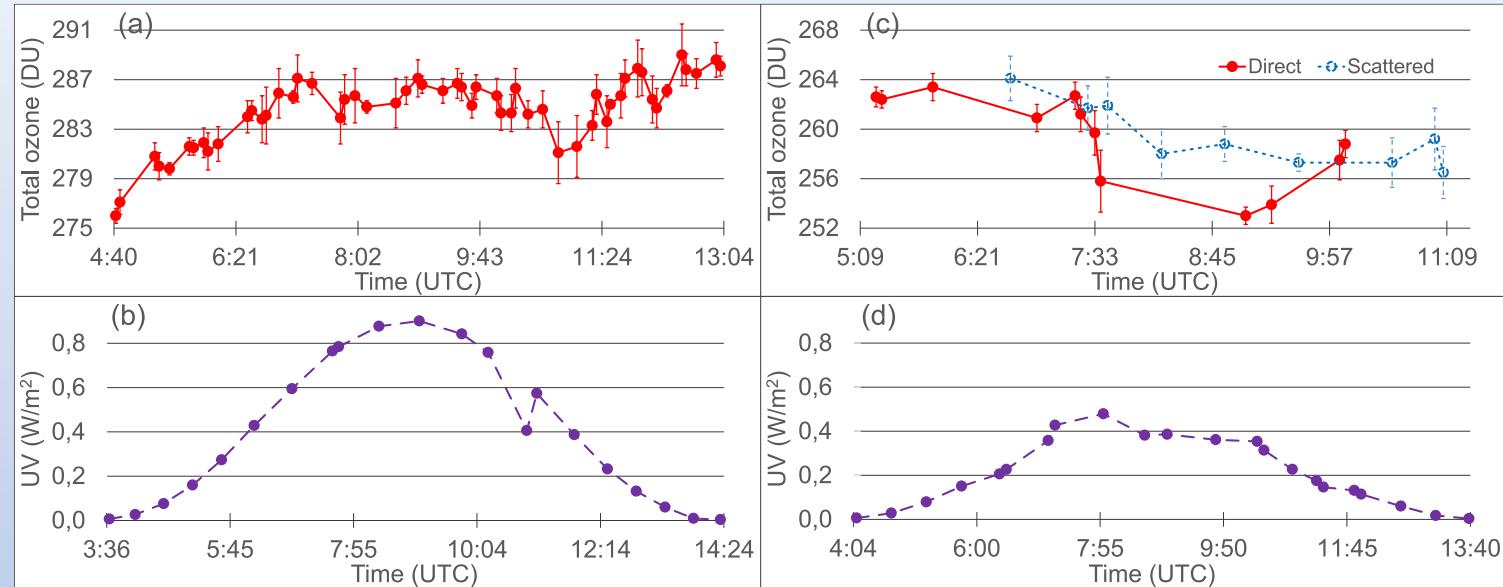
ВНС и вулкан Эльбрус



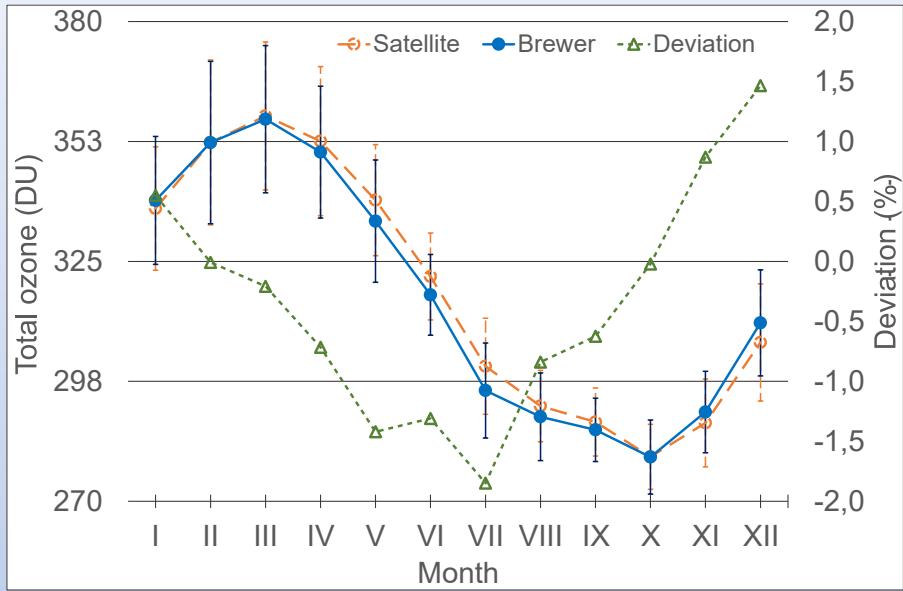
Brewer MkII #043 на ВНС

- На Высокогорной научной станции (ВНС) ИФА измерения ОС  $O_3$  на с/ф Брюэра ведутся с 1989 года.
- Высокая изменчивость  $O_3$  на ВНС связана с близостью субтропической высотной фронтальной зоны.
- С/ф Брюэра измеряет ОС  $O_3$  и  $SO_2$ , аэрозольную оптическую толщину, потоки УФ радиации (290–325 нм) и вертикальное распределение  $O_3$ .
- Разрешение Брюэра – 0.6 нм, точность измерения ОС  $O_3$  по прямой солнечной радиации – 1% (Kipp & Zonen, 2018).

# Метод измерений

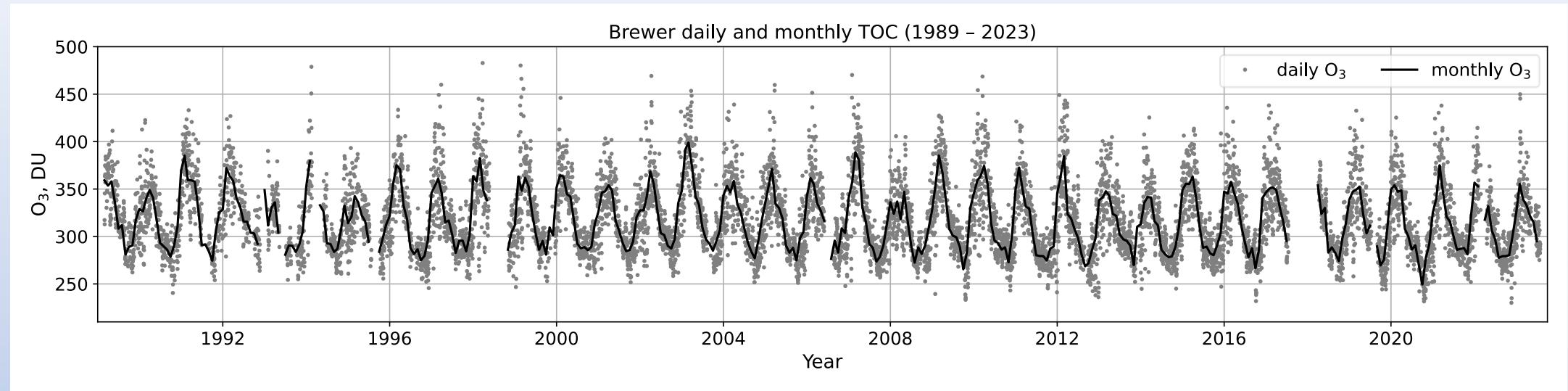


Примеры измерений ОС О<sub>3</sub> и УФ-Б радиации



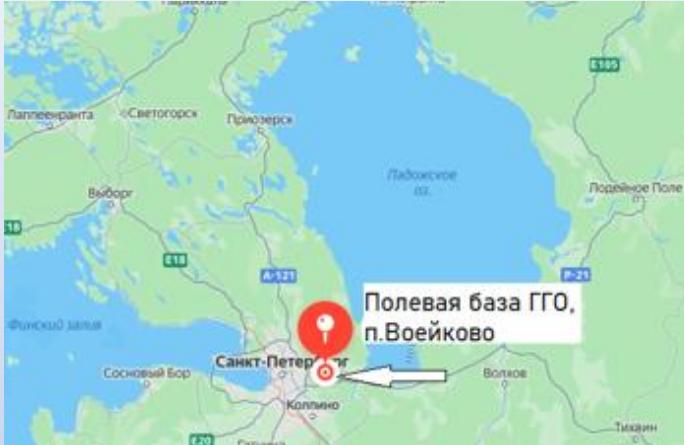
Средний годовой ход ОС О<sub>3</sub>

- ОС О<sub>3</sub> определяется из измерений по прямой (рассеянной) солнечной радиации в течение всего дня при зенитных углах Солнца < 75°.
- Каждое значение выводится как среднее по 5(7) измерениям со стандартным отклонением < 2.5 е.Д.
- Ошибка измерения О<sub>3</sub> связана с нестабильностью оптических характеристик атмосферы.
- В условиях облачности с/ф Брюэра измеряет О<sub>3</sub> по рассеянной в зените радиации.
- В марте–сентябре наземные значения О<sub>3</sub> ниже спутниковых (Nimbus-7, Meteor-3, Earth Probe и Aura), в ноябре–январе – выше; возможная причина – неоднородность альбедо и его сезонные изменения.



## Среднесуточные и среднемесячные значения ОС $O_3$

- Наблюдения на Брюэре проводятся стандартными методами в полностью автоматическом режиме.
- Данные измерений корректируются по тестам внутренней «эталонной» лампы, которые отслеживают стабильность прибора.
- Калибровки с/ф Брюэра #043 проводились в 1988, 1990, 1991, 1993, 1996, 2001, 2003, 2005, 2008 и 2012 гг. (по эталону Brewer MkII #017).
- До 2003 г. наблюдается тенденция к увеличения ОС  $O_3$ , а позднее – к его уменьшению.



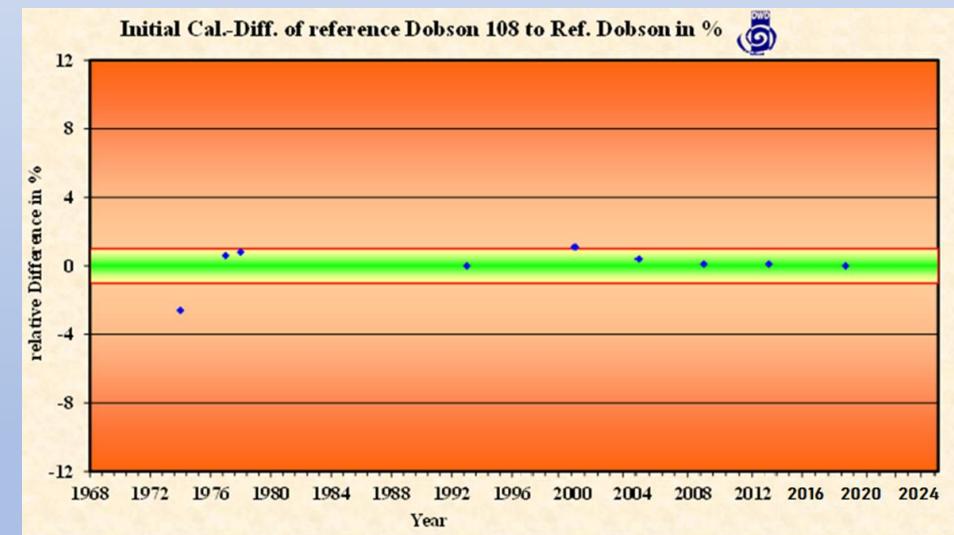
Актинометрический  
павильон ГГО

## Полевая база ГГО в п. Воейково является полигоном ГСА ВМО

- ГГО – центр ГСА ВМО по калибровке фильтровых озонометров.
- Российский рабочий эталон – озонный с/ф Добсона #108 – с 1976 г. участвует в международных сличениях.



Брюэр #043 и Добсон  
#108 (16.05.2025)



Сличение Добсона #108 с региональным  
стандартом (Германия, Хоэнпайсенберг)

# Метод сравнения приборов

- Калибровка с/ф Брюэра определяет коэффициент поглощения и внеатмосферную константу для измерения  $O_3$ .
- Некалиброванный прибор сравнивается с эталонным путем анализа совпадающих по времени наблюдений  $O_3$  по прямому Солнцу в широком диапазоне воздушных масс.
- После коррекции на темновой ток, время затухания ФЭУ, рэлеевское рассеяние и температуру прибора значение  $O_3$  рассчитывается по формуле:

$$O_3 \leftarrow \frac{MS_9 - B_1}{A_1 * M_2}$$

$MS_9$  – взвешенное отношение комбинации длин волн для  $O_3$ ,

$B_1$  – внеатмосферная константа  $O_3$  для комбинации длин волн,

$A_1$  – дифференциальный коэффициент поглощения  $O_3$  для комбинации длин,

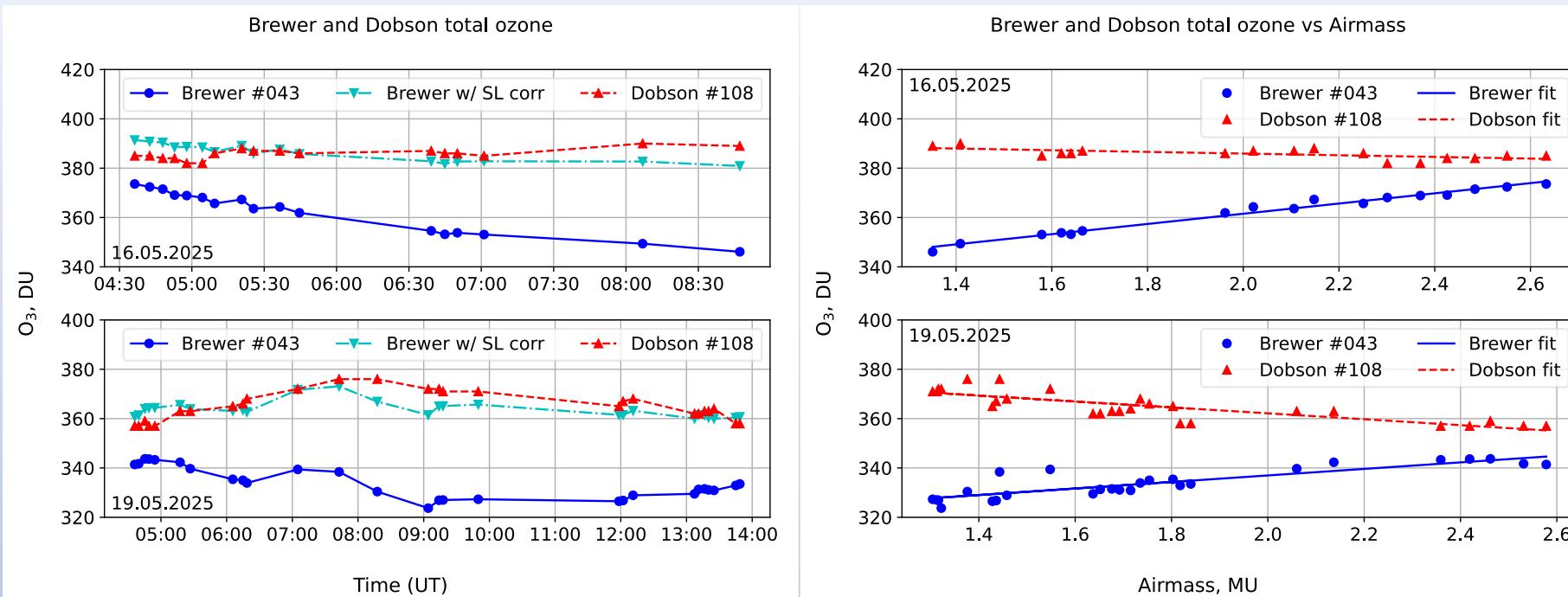
$M_2$  – воздушная масса для озонового слоя на высоте 22 км (Kipp & Zonen, 2018).

- Значение  $O_3$  определяется из измерений эталонного прибора, а  $MS_9$  и  $M_2$  – калибруемого прибора.
- Уравнение выше можно переписать как:

$$MS_9 \leftarrow B_1 + A_1 * M_2 * O_3$$

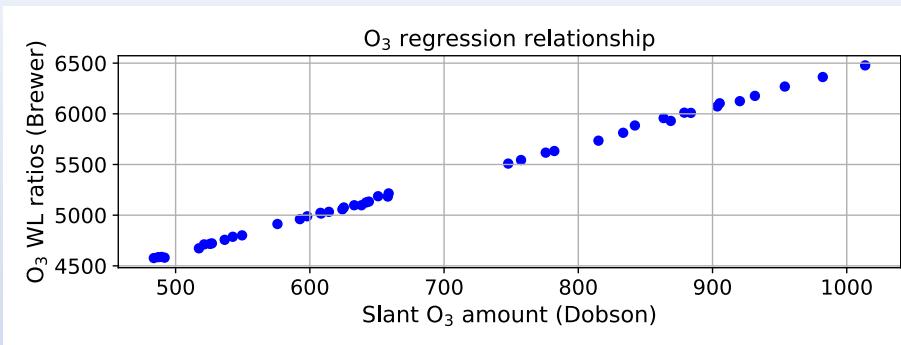
- Регрессионные коэффициенты  $B_1$  и  $A_1$ , полученные методом линейной регрессии, есть новые инструментальные константы калибруемого прибора.

# Результаты сравнения

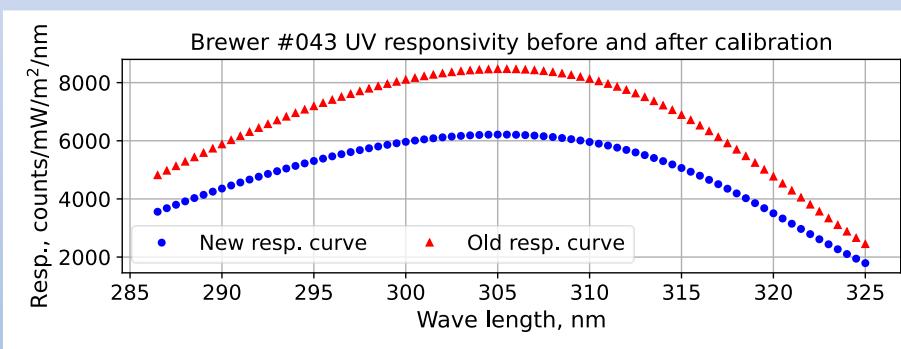


Измерения  $O_3$  до  
внесения изменений  
в инструментальные  
константы Брюэра

- Измерения  $O_3$  до калибровки выявили систематические отклонения показаний Брюэра от Добсона в пределах 3–14% в зависимости от воздушной массы.
- Такое расхождение и наличие «дневного хода» объясняется ремонтом усилителя ФЭУ Брюэра в 2016 г. без последующей калибровки.
- После коррекции по внутренней галогеновой лампе (контролирует стабильность работы прибора между калибровками) отклонения оказались в пределах  $\pm 2\%$  с небольшим «дневным ходом»  $O_3$ .



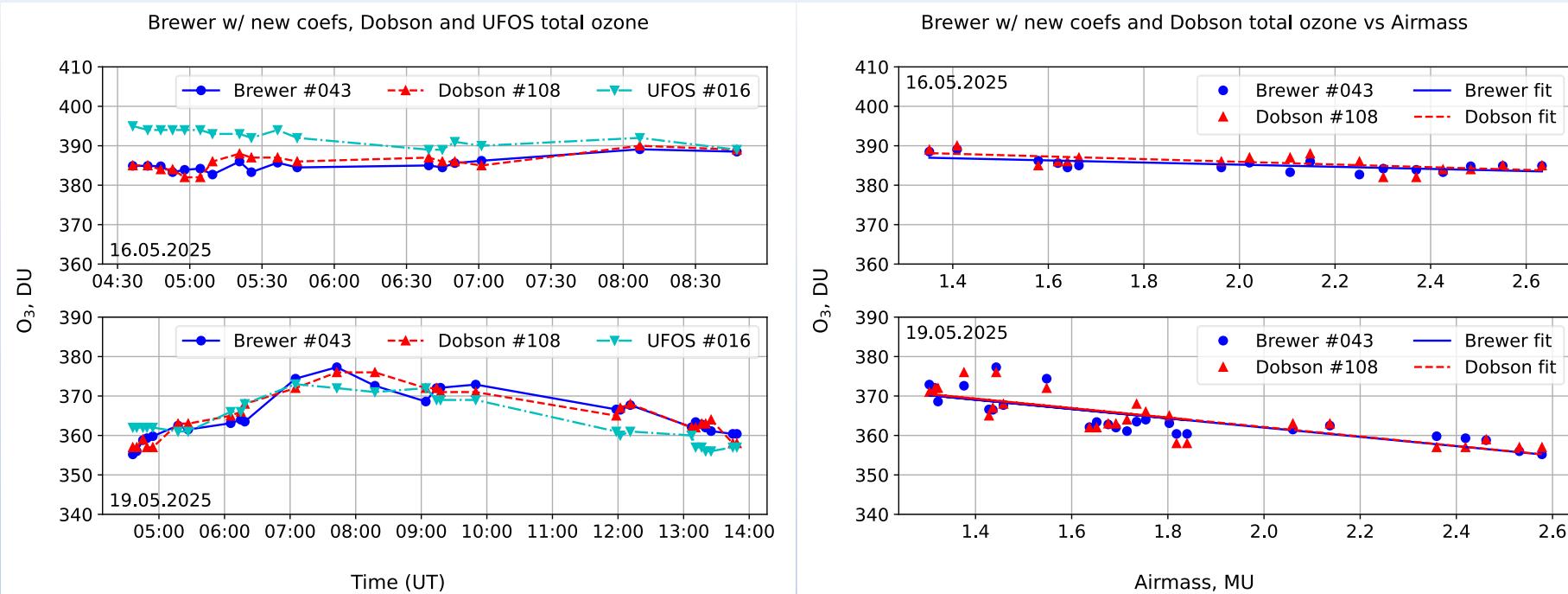
## Регрессионное соотношение



## Спектральная чувствительность

- Тест прямого сканирования солнца не выявил сдвига калибровки длин волн Брюэра.
- Наклон и сдвиг кривой – искомые дифференциальный коэффициент поглощения и внеатмосферная константа для  $O_3$ .
- Спектральная чувствительность с/ф Брюэра в УФ области определялась по измерениям потока излучения эталонной галогеновой лампы ГГО КГМ120-1000 #019.
- Изменение абсолютной чувствительности прибора с последней калибровки ~26% по всему измеряемому диапазону, что вызвано ремонтом платы усилителя ФЭУ.

# Результаты сравнения



- Отклонения ОС O<sub>3</sub> с новыми инструментальными константами от Добсона по всем измерениям для различных воздушных масс составили < 1%.
- Погодные условия не позволили провести измерения Брюэра с новыми константами, поэтому приведены данные УФОС №016 (отклонение < 2.5%).
- УФОС (Ультрафиолетовый Озонный Спектрометр) разработан в ГГО для замены фильтровых приборов М-124 на сети Росгидромета.

Измерения O<sub>3</sub> после  
внесения изменений  
в инструментальные  
константы Брюэра



UFOS #016 в Воецково

- Рассмотрена возможность калибровки полностью автоматизированного с/ф Брюэра по данным измерений ОС O<sub>3</sub> с/ф Добсона, которые выполняются оператором вручную.
- Проведены синхронные измерения O<sub>3</sub> по прямой солнечной радиации на Brewer MkII #043 ИФА РАН и эталонном Dobson #108 ГГО.
- Измерения O<sub>3</sub> до калибровки выявили систематические отклонения показаний Брюэра от Добсона в пределах 3–14% в зависимости от воздушной массы.
- Большое расхождение и наличие «дневного хода» в данных Брюэра объясняется ремонтом усилителя ФЭУ в 2016 году без последующей калибровки по эталону.
- Расхождения ОС O<sub>3</sub> по измерениям Брюэра с новыми коэффициентами от эталонного Добсона (< 1%) не превышает погрешности измерений на с/ф Брюэра.
- Оставшийся «дневной ход» O<sub>3</sub> впоследствии был устраниён по данным спутниковых измерений Aura ОМI над территорией ВНС ИФА.
- Абсолютная чувствительность прибора за период с 2012 года снизилась на ~26% во всём диапазоне 290–325 нм, что в основном вызвано ремонтом усилителя ФЭУ в 2016 году.
- Результаты теста прямого сканирования солнца показали, что настройка шага микрометра для калибровки длины волны с/ф Брюэра не требует изменений.

Работа выполнена в рамках Гос. заданий (№125020501413-6 и №169-00031-25-00, напр. 4.1).

1. *IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report*, IPCC, Geneva (2014).
2. *WMO. Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022*, WMO, Geneva (2022).
3. *Savinykh V. V., Elansky N. F., Gruzdev A. N. Interannual variations and long term trends in total ozone over the North Caucasus*, *Atmos. Environ.* 251, 118252 (2021).
4. *UNEP. Handbook for the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, Ozone Secretariat, Nairobi (2018).
5. *Kipp & Zonen. Brewer MkIII Spectrophotometer Operator's Manual*, Rev H. Delft: Kipp & Zonen (2018).
6. *Elansky N. F., Savinykh V. V., Arabov A. Ya. et al. July 2001 calibration of the Brewer spectrophotometers used in Russia*, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. Vol. 38, No. 4. P. 510-512 (2002).
7. *WMO. Operations Handbook – Ozone Observations with a Dobson Spectrophotometer*, GAW Report No. 183, 85 pp., WMO, Geneva, (2008).
8. *WMO. Guide to Instruments and Methods of Observation*, WMO-No. 8, Vol. I, 542-543 pp., WMO, Geneva (2025).
9. *Komhyr W. D. Operations handbook – Ozone observations with a Dobson Spectrophotometer*, Rev. Evans R. D., WMO, 91 p. (2006).

**Благодарим за внимание!**