

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

Савиных В. В.¹, Соломатникова А. А.²

¹ Институт физики атмосферы им. А. М. Обухова РАН, Москва

² Главная геофизическая обсерватория им. А. И. Воейкова, Санкт-Петербург

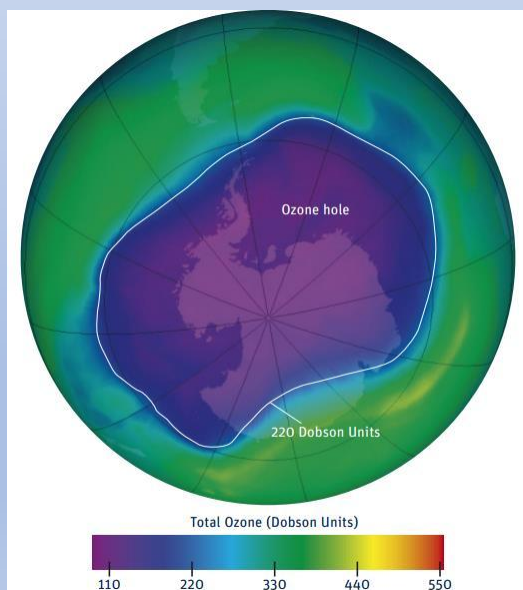
**XXIII Международная Конференция «СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»**

10 – 14 ноября 2025 года, Москва

amita@ifaran.ru, pulsin@mail.ru

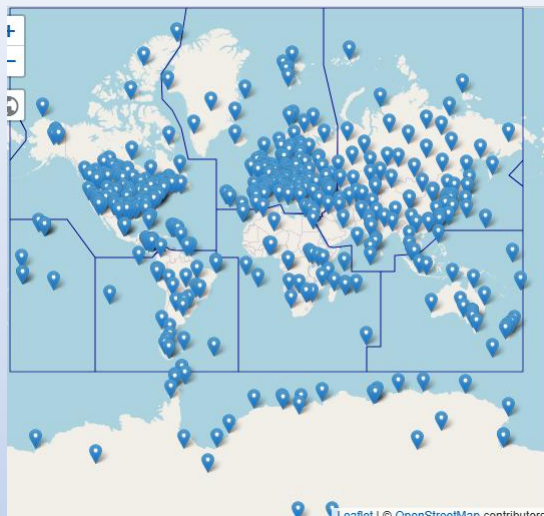


Озоновый слой Земли



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 (ОРВ) 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).

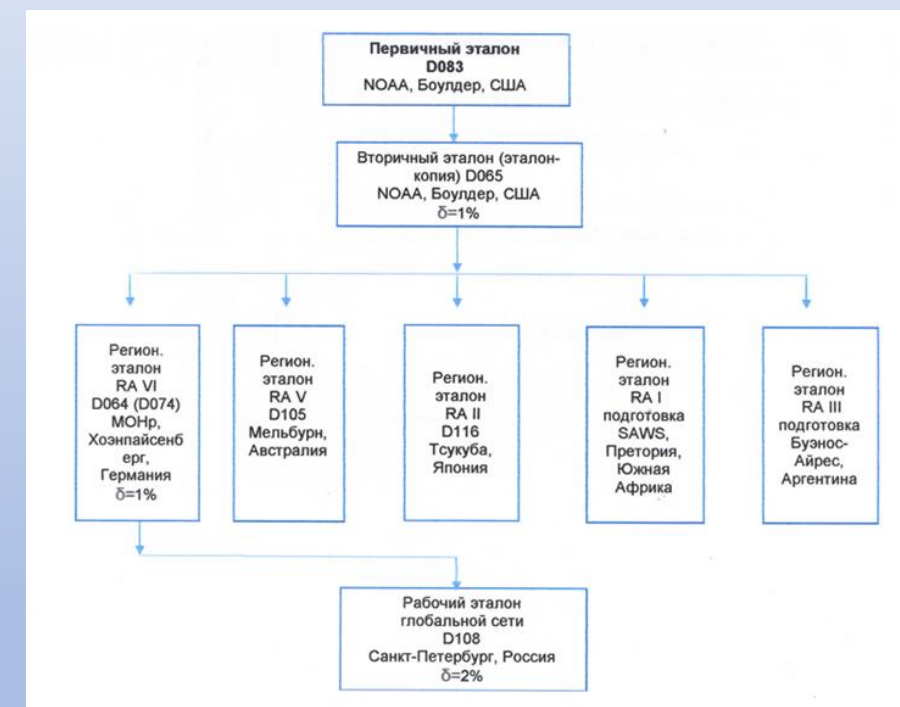


- Глобальный мониторинг общего содержания озона (ОС O_3) обеспечивается за счет сети станций ГСА (UNEP, 2018).
- Сеть оснащена спектрофотометрами (с/ф) Добсона и Брюэра, фильтровыми озонometрами и зенитными спектрометрами.

Озонометрические станции 1953 – 2025 гг.



Интеркалибровка с/ф Добсона и Брюэра



Шкала мировой озонометрической
сети передается методом сличений

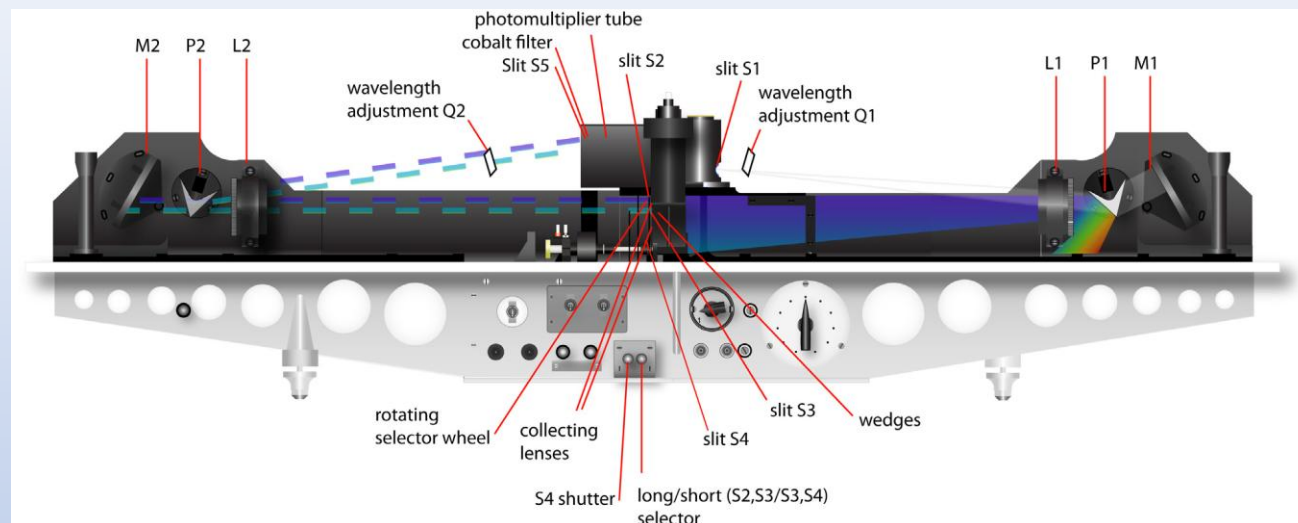
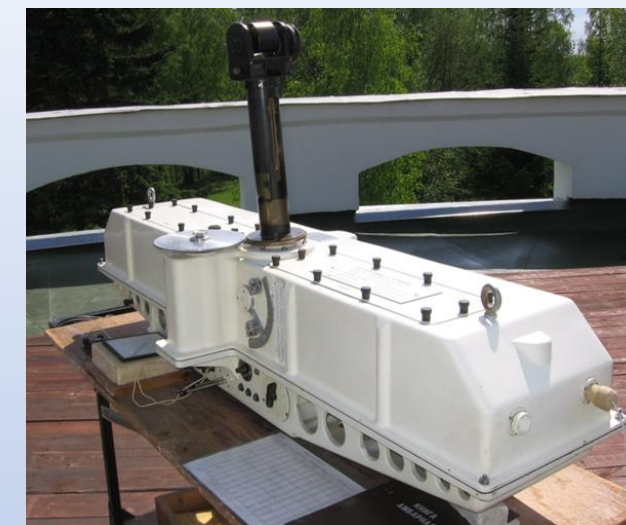


Схема с/ф Добсона



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.

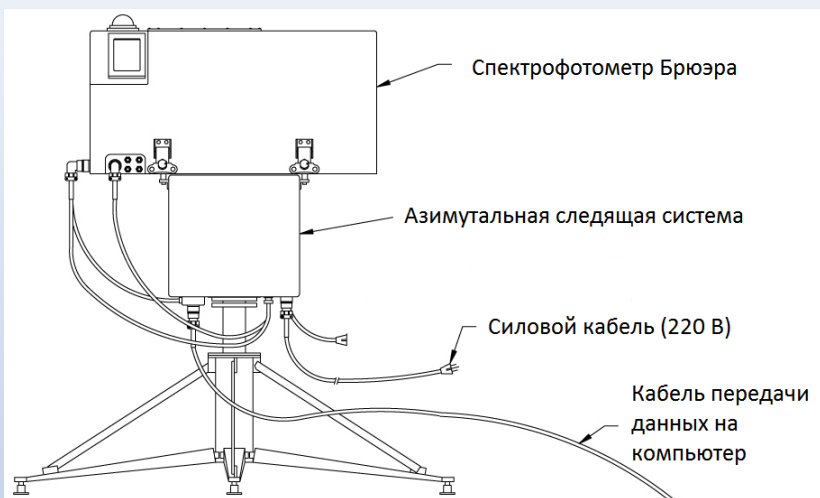


Схема с/ф Брюэра

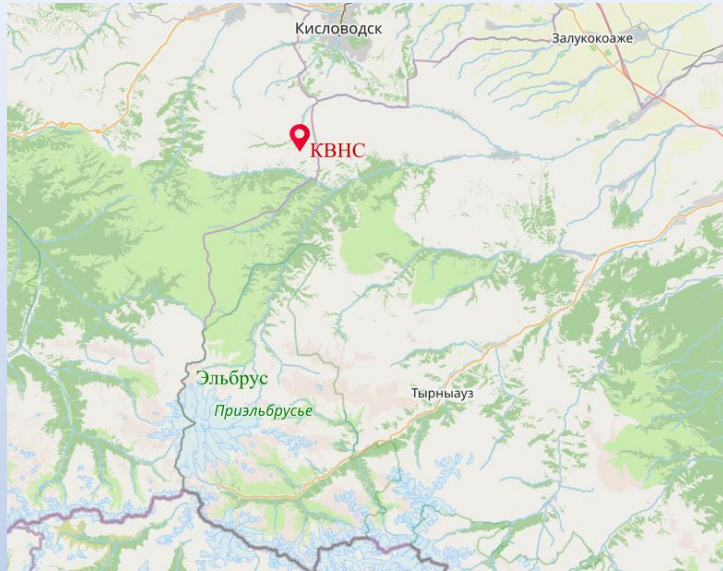


С/ф Брюэра по миру



Эталонные Брюэры в Торонто

- С/ф Брюэра измеряет спектральный состав прямой, рассеянной и суммарной УФ радиации.
- ОС О₃ 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).



ВНС ИФА РАН

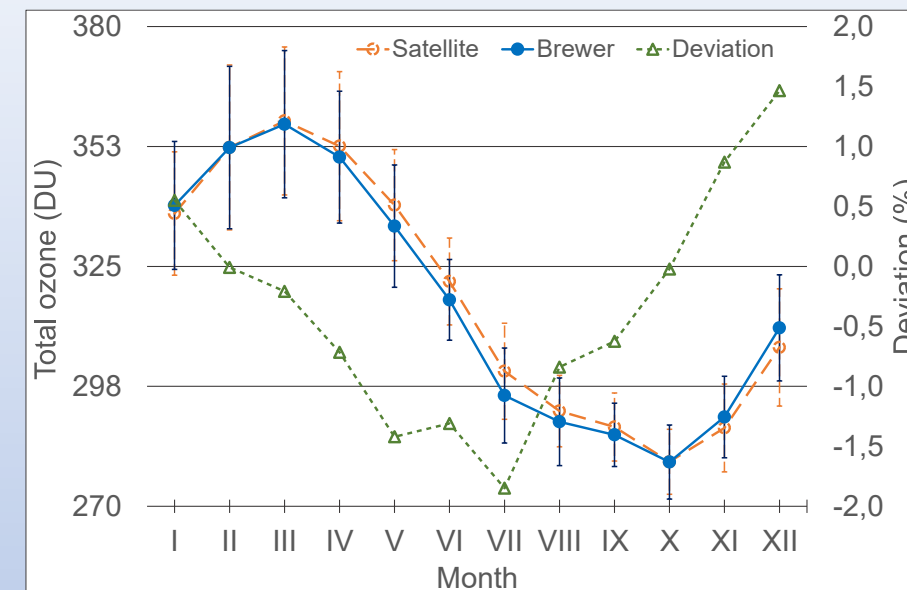
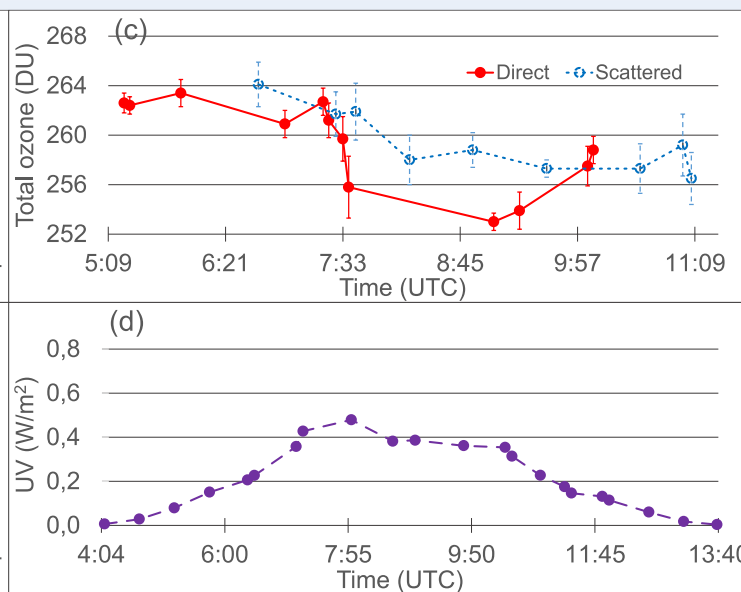
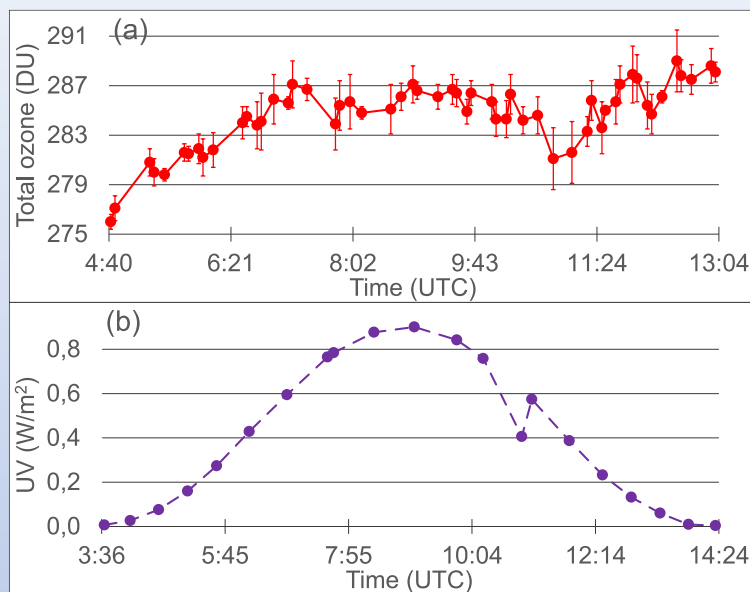


ВНС и вулкан Эльбрус



Brewer MkII #043 на ВНС

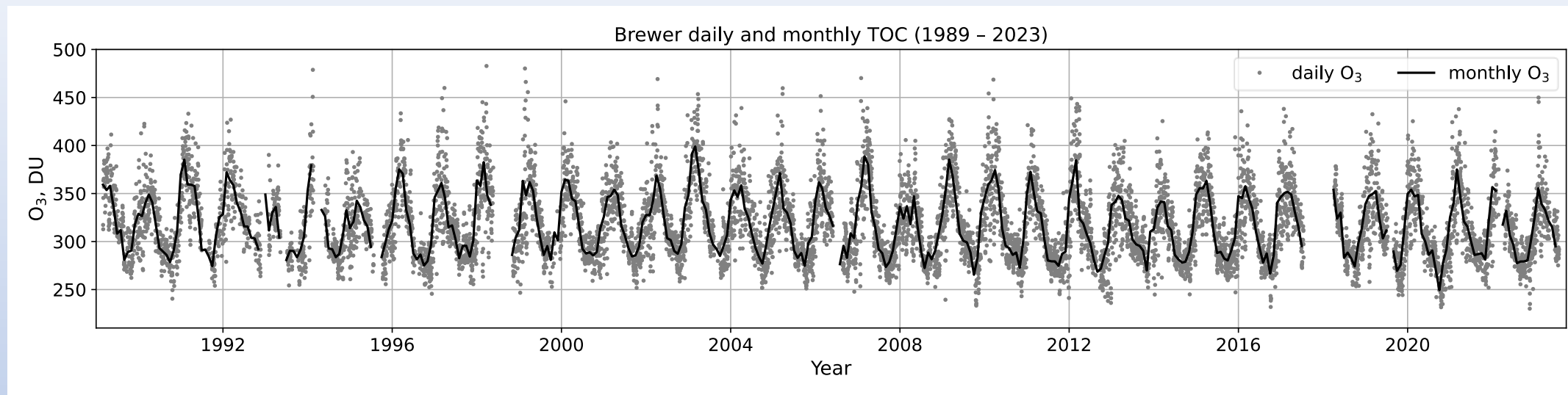
- На Высокогорной научной станции (ВНС) ИФА измерения ОС O_3 на с/ф Брюэра ведутся с 1989 года.
- Высокая изменчивость O_3 на ВНС связана с близостью субтропической высотной фронтальной зоны.
- С/ф Брюэра измеряет ОС O_3 и SO_2 , аэрозольную оптическую толщину, потоки УФ радиации (290–325 нм) и вертикальное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



Примеры измерений ОС O_3 и УФ-Б радиации

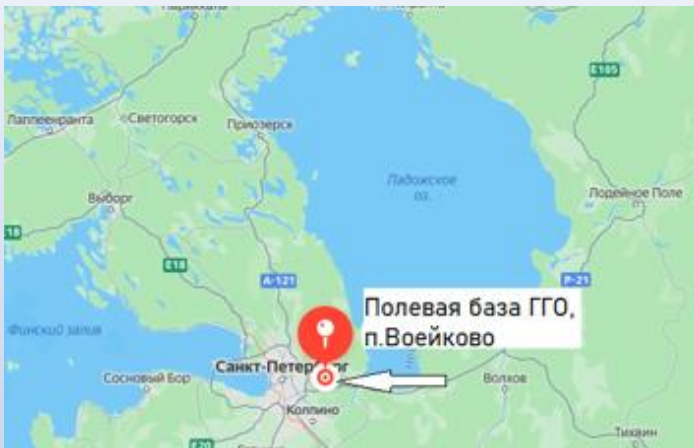
- ОС O_3 определяется из измерений по прямой (рассеянной) солнечной радиации в течение всего дня при зенитных углах Солнца $< 75^\circ$.
- Каждое значение выводится как среднее по 5(7) измерениям со стандартным отклонением < 2.5 е.Д.
- Ошибка измерения O_3 связана с нестабильностью оптических характеристик атмосферы.
- В условиях облачности с/ф Брюэра измеряет O_3 по рассеянной в зените радиации.
- В марте–сентябре наземные значения O_3 ниже спутниковых (Nimbus-7, Meteor-3, Earth Probe и Aura), в ноябре–январе – выше; возможная причина – неоднородность альбедо и его сезонные изменения.

Средний годовой ход ОС O_3



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 увеличению ОС O_3 , а позднее – к его уменьшению.



Полевая база ГГО в п. Воейково является полигоном ГСА ВМО

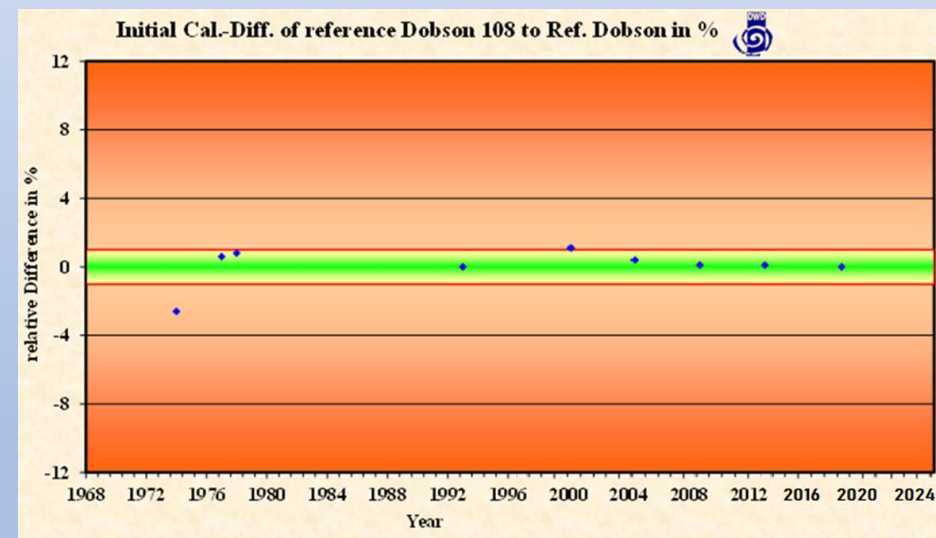
- ГГО – центр ГСА ВМО по калибровке фильтровых озонметров.
- Российский рабочий эталон – озонный с/ф Добсона #108 – с 1976 г. участвует в международных сличениях.



Актинометрический
павильон ГГО



Брюэр #043 и Добсон
#108 (16.05.2025)



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

- 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,

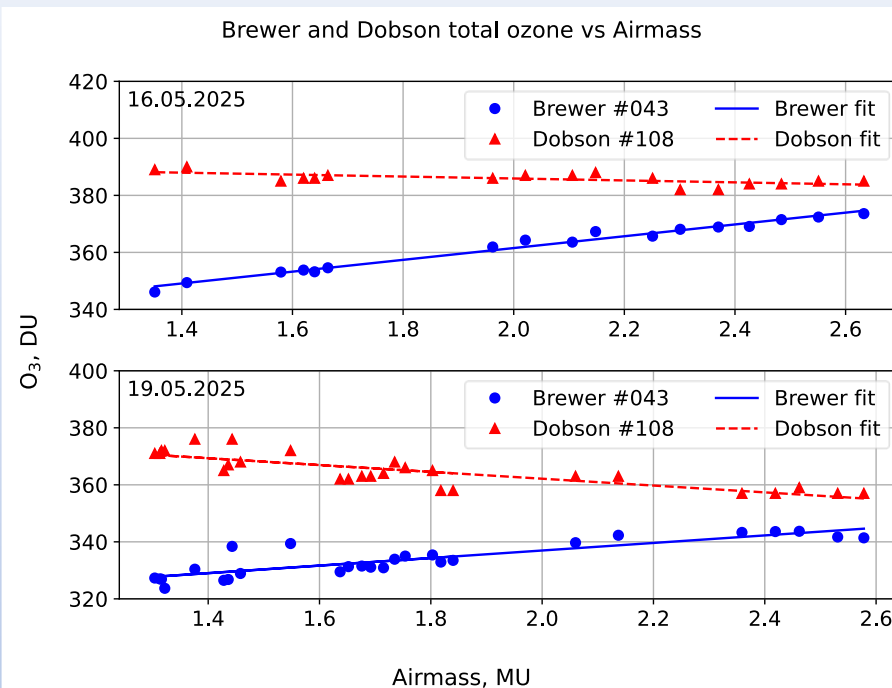
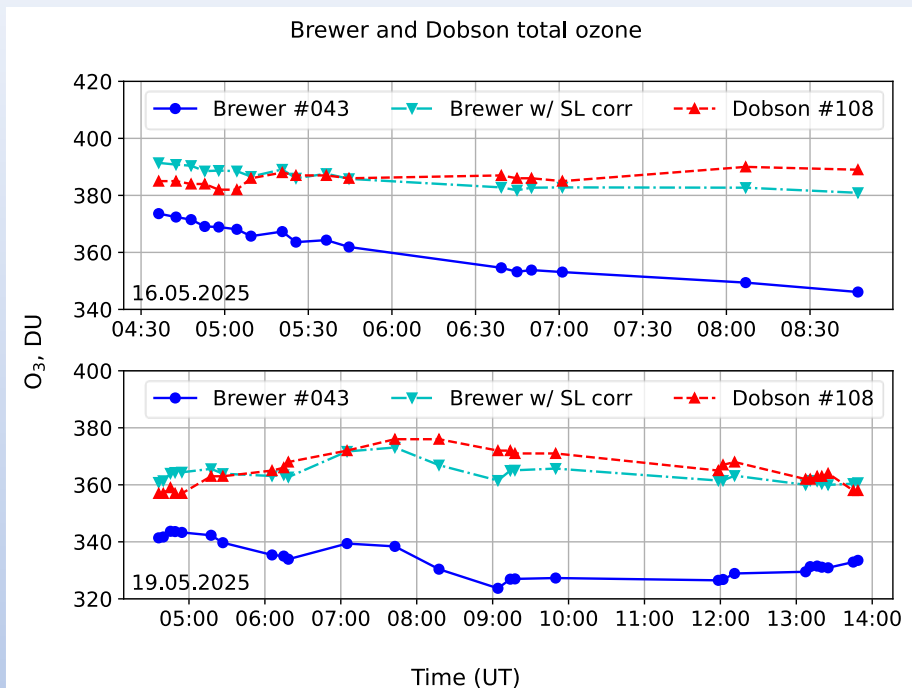
A_1 – дифференциальный коэффициент поглощения O_3 для комбинации длин,

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

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

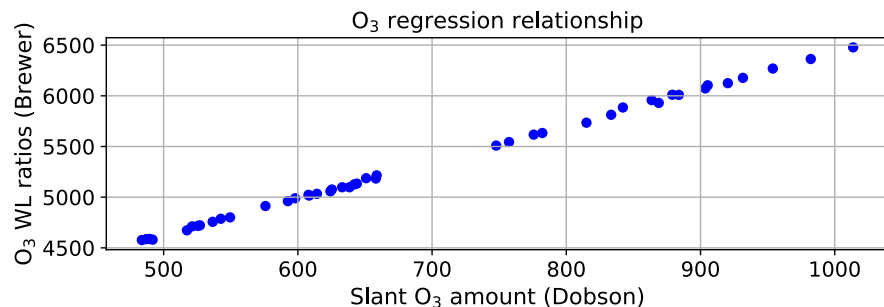
$$MS_9 \leftarrow B_1 + A_1 * M_2 * O_3$$

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

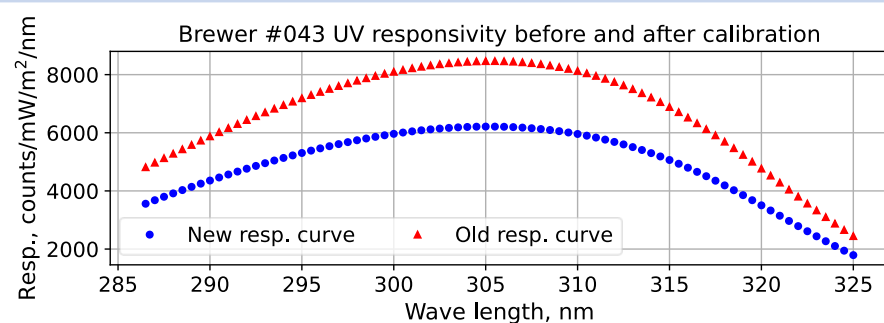


**Измерения O₃ до
внесения изменений
в инструментальные
константы Брюэра**

- Измерения O₃ 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» O₃.

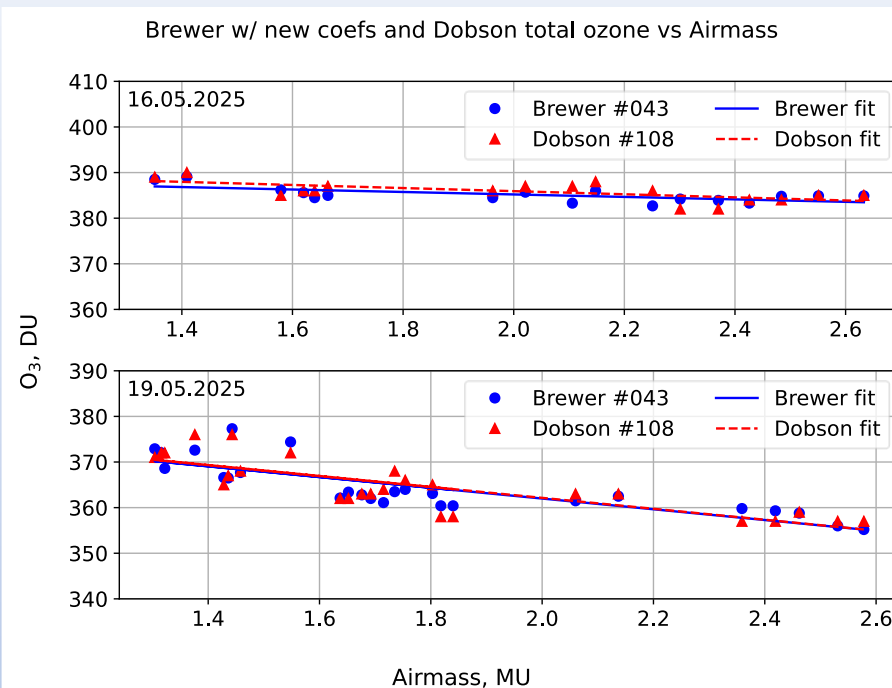
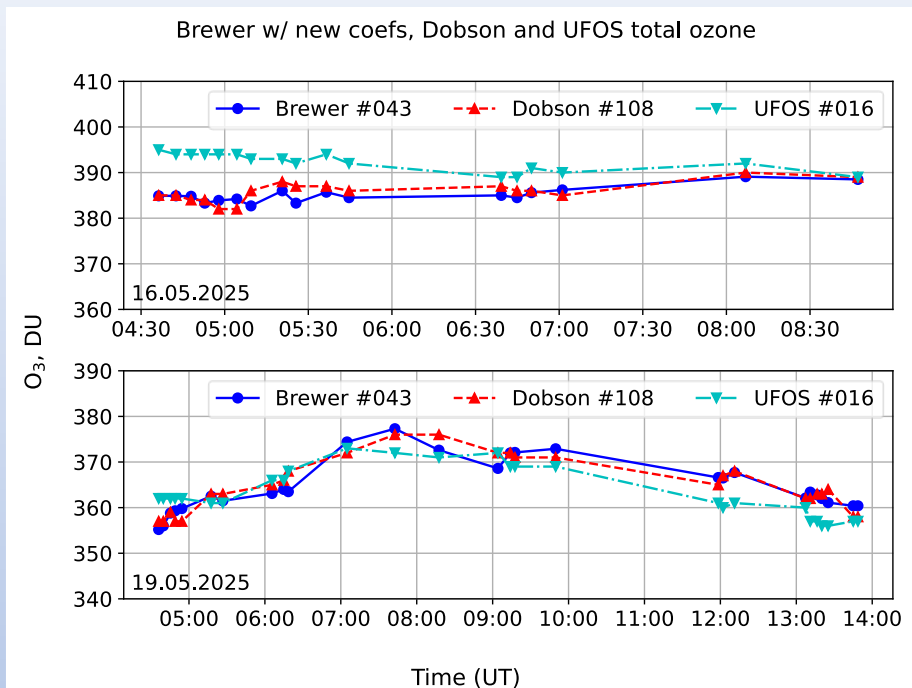


Регрессионное соотношение



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 ГО КГМ120-1000 #019.
- Изменение абсолютной чувствительности прибора с последней калибровки ~26% по всему измеряемому диапазону, что вызвано ремонтом платы усилителя ФЭУ.



**Измерения O_3 после
внесения изменений
в инструментальные
константы Брюэра**



UFOS #016 в Воейково

- Отклонения ОС O_3 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.

- Рассмотрена возможность калибровки полностью автоматизированного с/ф Брюэра по данным измерений ОС O_3 с/ф Добсона, которые выполняются оператором вручную.
- Проведены синхронные измерения O_3 по прямой солнечной радиации на Brewer MkII #043 ИФА РАН и эталонном Dobson #108 ГГО.
- Измерения O_3 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_3 по измерениям Брюэра с новыми коэффициентами от эталонного Добсона ($< 1\%$) не превышает погрешности измерений на с/ф Брюэра.
- Оставшийся «дневной ход» O_3 впоследствии был устранён по данным спутниковых измерений Aura OMI над территорией ВНС ИФА.
- Абсолютная чувствительность прибора за период с 2012 года снизилась на $\sim 26\%$ 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!