

Девятнадцатая международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»

15 – 19 ноября 2021, Москва

**Многолетние измерения общего
содержания озона над Северным Кавказом**

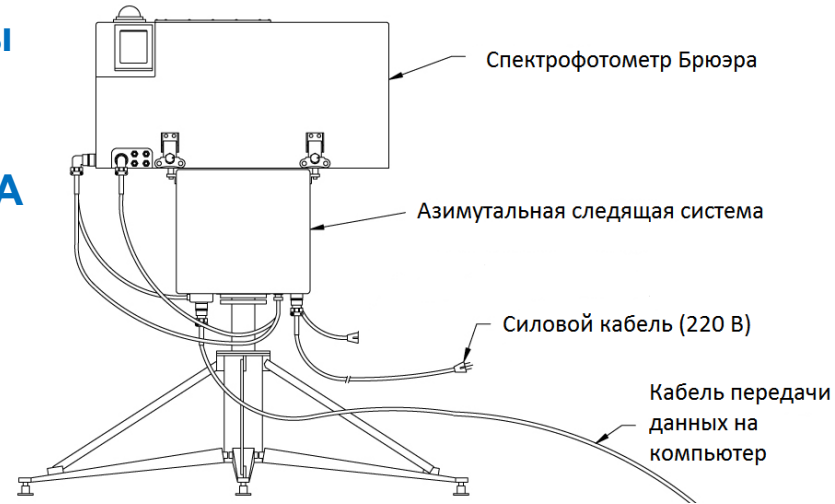
Савиных В.В.

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

E-mail: amita@ifaran.ru



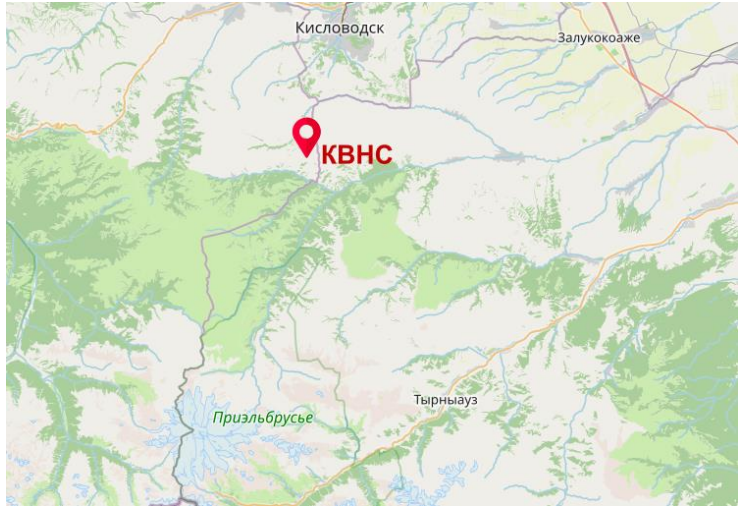
Спектрофотометры Brewer по миру; **зелёный** – Brewer MkII #043 КВНС ИФА (рис. Kirp & Zonen)



С/ф Brewer для измерений общего содержания O_3 и УФ радиации (рис. Kirp & Zonen)

Содержание озона (O_3) в атмосфере определяет уровень биологически активной УФ солнечной радиации на земной поверхности, а его изменения оказывают влияние на климат Земли (IPCC, 2014). Различные природные фотохимические и циркуляционные факторы существенно влияют на пространственно-временную изменчивость озона, среди них цикл солнечной активности, мощные извержения вулканов и вариации крупномасштабной атмосферной циркуляции из-за квазидвухлетней цикличности (КДЦ), Североатлантического колебания (САК) и Эль-Ниньо–Южного колебания (ЭНЮК). Для глобального мониторинга озона была создана сеть станций, и около 80-ти из них оснащены спектрофотометрами Brewer.

Местоположение КВНС ИФА РАН

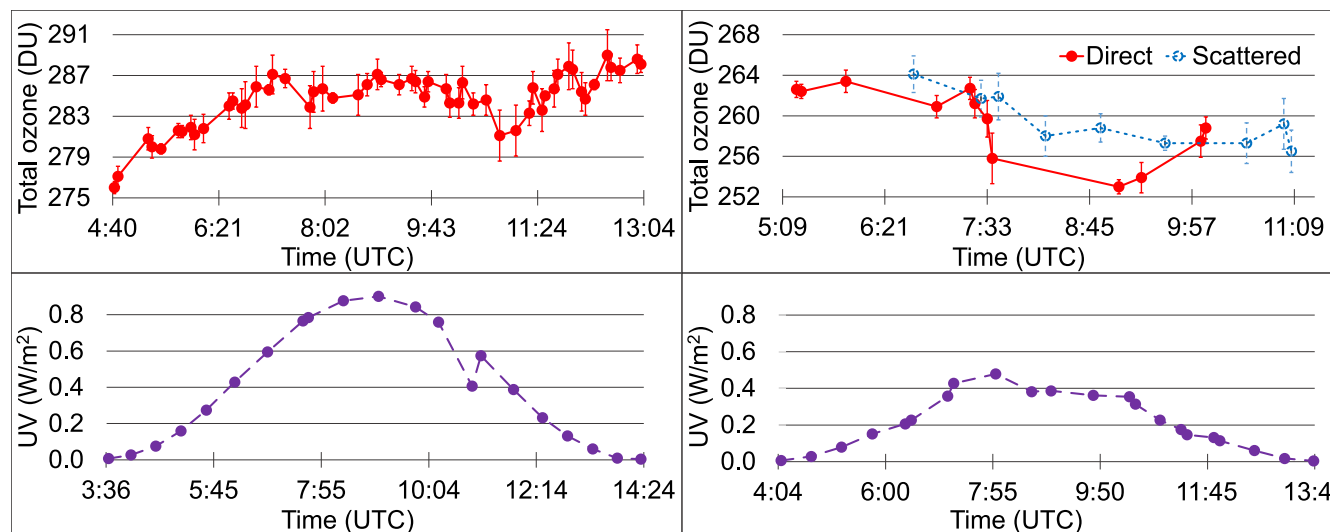


Вид с КВНС на Главный Кавказский хребет и в. Эльбрус



Кисловодская высокогорная научная станция (КВНС) ИФА им. А.М. Обухова РАН была организована в 1978 году. Станция расположена на Северном Кавказе (43.7° с.ш., 42.7° в.д.) в зоне альпийских лугов на высоте 2070 м над уровнем моря. Расстояние между КВНС и Главным Кавказским хребтом и вулканом Эльбрус (5642 м) составляет около 50 км. Географическое положение КВНС совпадает с активным участком субтропической планетарной высотной фронтальной зоны (СПВФЗ), которая влияет на динамические процессы и содержание примесей в стратосфере, что сказывается на общем содержании озона (ОСО) в районе станции. КВНС участвует в программе Глобальной службы атмосферы Всемирной метеорологической организации (WMO GAW).

Brewer MkII #043



Примеры изменчивости ОСО и УФ излучения при различных погодных условиях в течение дня

Спектрофотометр Brewer MkII #043 на КВНС выполняет регулярные измерения O_3 и спектрального УФ излучения с 1989 года. ОСО извлекается из измерений прямой (и рассеянной) радиации в светлое время суток при зенитных углах Солнца менее 75° . Значение ОСО определяется как среднее по пяти (семи) последовательным измерениям; если рассчитанное стандартное отклонение не превышает 2.5 е.Д., то значение считается достоверным. Основная погрешность измерения O_3 обусловлена нестабильностью оптических характеристик атмосферы. Первичные данные ОСО корректируются по тестам внутренней вольфрамово-галогенной (эталонной) лампы, которая контролирует стабильность работы прибора во всем диапазоне рабочих длин волн.

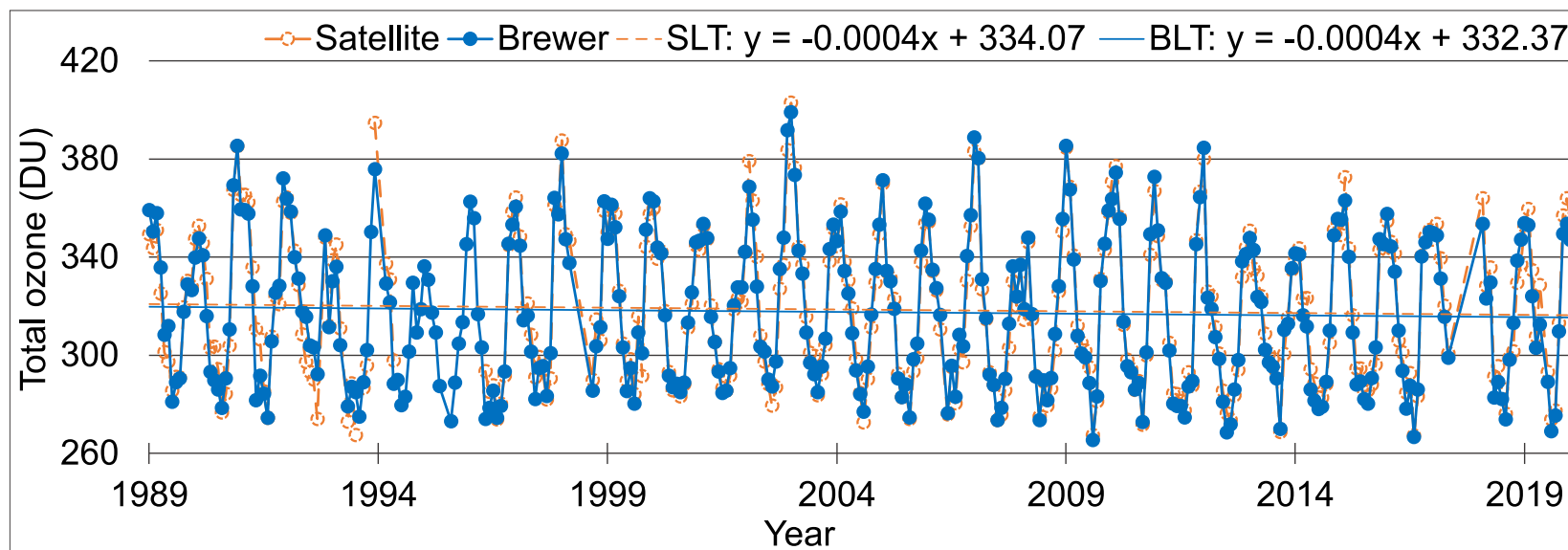
Статистические характеристики ОСО по прямому излучению Солнца на КВНС с марта 1989 по март 2020

<i>N</i>	<i>Значение (е.Д.)</i>						<i>Перцентиль, %</i>		
	<i>Мин.</i>	<i>Макс.</i>	<i>Среднее</i>	<i>S</i>	<i>Медиана</i>	<i>Мода</i>	<i>25</i>	<i>75</i>	<i>95</i>
8354	231.9	482.4	318.3	37.7	312.6	281.1	288.9	342.3	387.9

N – количество измерений; *S* – стандартное отклонение; *Мода* – значение, которое встречается чаще всего; *Медиана* – значение, которое находится в середине упорядоченного ряда; *Перцентиль* – значение, которое не превышает с фиксированной вероятностью

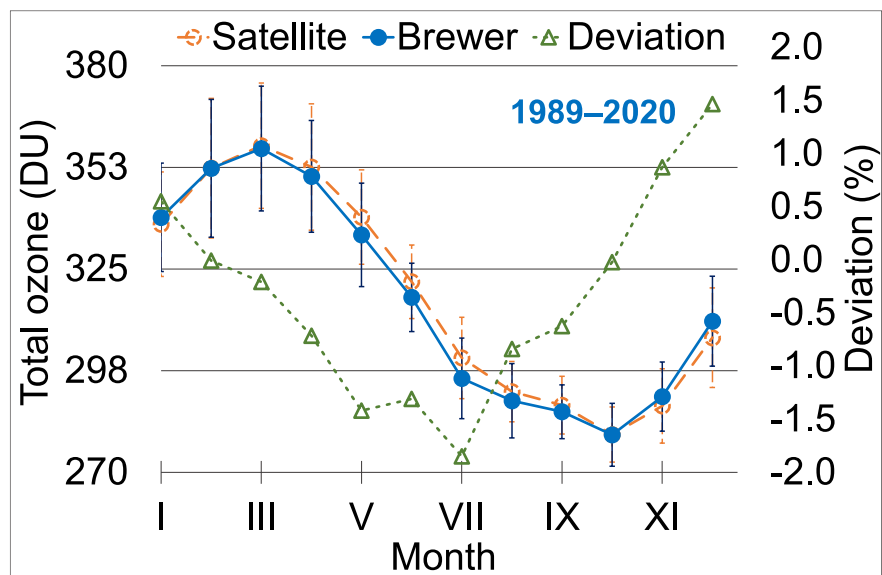
Для изучения временной изменчивости O_3 были использованы данные, полученные на Brewer MkII #043 с 1989 по 2020 год. Наблюдения проводились стандартными методами при любых погодных условиях в автоматическом режиме. При поддержке WMO прибор проходил калибровку по мобильному эталону Brewer MkII #017 (Environment Canada) в 1988, 1990, 1991, 1993, 1996, 2001, 2003, 2005, 2008 и 2012 году. Среднее за весь период наблюдений суточное значение ОСО составляет 318.3 ± 75.4 е.Д. с распределением вероятностей, близким к нормальному. Резко увеличенные суточные значения (макс. 482.4 е.Д.) связаны с приходом в регион арктических воздушных масс, а самые низкие (мин. 231.9 е.Д.) наблюдались в тропических воздушных массах.

Среднемесячные значения ОЗО по данным Brewer и спутника



На рисунке приведено сравнение среднемесячных значений ОЗО по данным наземных измерений на КВНС и спутниковых измерений приборов TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) и OMI (Ozone Monitoring Instrument) во время прохождения спутника над станцией. Для сравнения были использованы последние версии данных ОЗО, полученные по измерениям на спутниках Nimbus-7 (TOMS), Meteor-3 (TOMS), Earth Probe (TOMS) и Aura (OMI). Данные TOMS и OMI для местоположения КВНС подготовлены NASA и доступны как участникам валидации TOMS и OMI. Две серии данных демонстрируют хорошее согласие и аналогичную долговременную изменчивость.

Среднегодовой ход ОСО Brewer и спутника



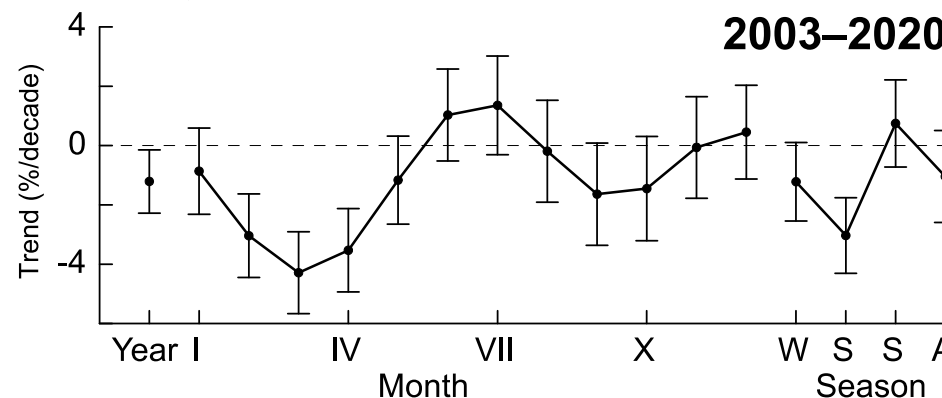
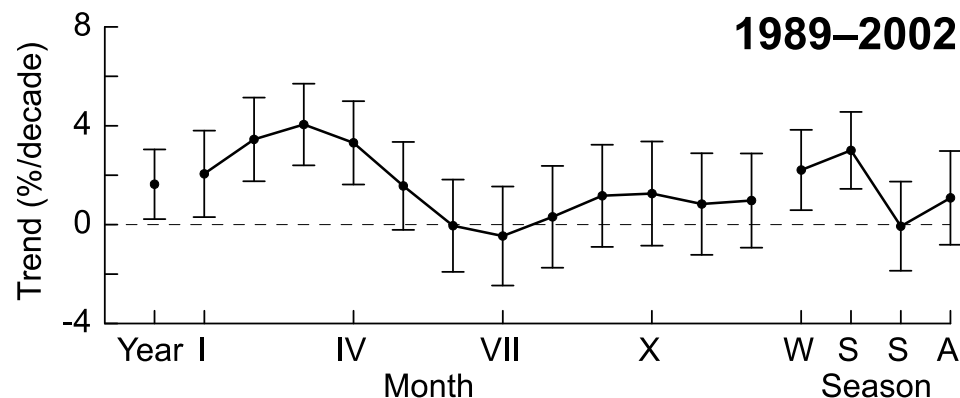
Среднемесячные значения ОСО за 1989–2020

Месяц	Brewer	S	Спутник	S	Откл. (%)
Январь	339.0	14.7	337.1	14.1	0.55
Февраль	352.3	18.6	352.3	18.9	-0.01
Март	357.6	16.9	358.4	17.0	-0.21
Апрель	350.1	15.1	352.6	17.1	-0.72
Май	334.2	14.0	339.1	12.7	-1.42
Июнь	317.3	9.3	321.5	10.0	-1.31
Июль	295.4	10.9	301.0	11.0	-1.85
Август	289.4	10.1	291.8	8.2	-0.84
Сентябрь	286.4	7.3	288.2	7.8	-0.62
Октябрь	280.1	8.5	280.2	7.5	-0.02
Ноябрь	290.5	9.3	288.0	10.1	0.87
Декабрь	310.9	12.2	306.4	13.4	1.46

S – стандартное отклонение; **Откл.** – отклонение Brewer от спутника

Среднесезонные вариации наземных и спутниковых измерений также хорошо согласуются и соответствуют сезонному циклу ОСО для средних широт Северного полушария: максимумы ОСО (357.6 ± 33.8 е.Д.) наблюдаются в марте, а минимумы (280.1 ± 17.0 е.Д.) – в октябре. Различия между наземными и спутниковыми данными меньше 2%; заметна схожесть стандартных отклонений среднемесячных значений и сезонный характер отклонений: в марте–сентябре наземные данные несколько меньше спутниковых, а в ноябре–январе больше. Возможной причиной таких отклонений является неоднородное альбедро подстилающей поверхности в окрестности станции и его сезонные изменения, которые трудно учесть при дистанционном зондировании со спутника.

Годовые, месячные и сезонные оценки линейных трендов ОСО на КВНС (рис. Груздева А.Н.)



Долгосрочная изменчивость озона над Северным Кавказом под влиянием фотохимических и циркуляционных факторов была проанализирована методом множественной линейной регрессии (Gruzdev, 2019) с использованием среднемесячных данных ОСО. На рисунке показаны линейные тренды ОСО для 1989–2002 и 2003–2020 гг. Годовая оценка тренда положительна (1,6% за 10 лет) для первого интервала и отрицательна (–1,2% за 10 лет) для второго (Savinykh et al., 2021). Однако, согласно WMO (2018) до 1996 г. годовой тренд на широте КВНС составлял –3% за 10 лет, а после тренд был слабоположительным. Можно предположить, что изменения атмосферной циркуляции, влияющие на положение СПВФЗ, играют важную роль в долгосрочных изменениях ОСО в районе станции.

Согласно Savinykh et al. (2021):

- Максимальное влияние солнечного цикла на ОСО наблюдается летом; связанное с этим изменение O_3 приближается к 5%, отставая на 1.5 года от солнечного цикла.
- Влияние КДЦ на ОСО выражено с осени до начала весны; связанное с этим изменение O_3 зимой составляет около 6%.
- Связь ОСО с САК проявляется с конца зимы до весны; максимальный отклик O_3 составляет 1.5% на одно изменение стандартного отклонения индекса САК.
- Эффект ЭНЮК в O_3 около 2% наблюдается летом; события Эль-Ниньо способствуют снижению ОСО с запаздыванием около 1 года, в то время как события Ла-Ниньи способствуют увеличению ОСО.

- КВНС расположена в зоне влияния субтропической планетарной высотной фронтальной зоны на динамические процессы и содержание примесей в стратосфере.
- 31-летняя серия наблюдений O_3 на спектрофотометре Brewer MkII #043 на КВНС позволила проанализировать межгодовые вариации и долгосрочные тренды ОСО.
- Данные измерений ОСО проанализированы методом множественной линейной регрессии. Полученные оценки трендов на КВНС контрастируют по знаку с трендами для среднезональных значений ОСО.
- Особенности трендов и межгодовых вариаций озона на КВНС указывают на специфический характер эволюции O_3 над Северным Кавказом.

Работа выполнена в ходе исследования № 0129-2019-0002.

1. *Gruzdev A.N.* Accounting for autocorrelation in the linear regression problem by an example of analysis of the atmospheric column NO₂ content // *Izvestiya Atmos. Ocean. Phys.* 2019. V. 55. P. 65–72.
2. *IPCC.* Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. 151 p.
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.* 2021. V. 251, 118252.
4. *WMO.* Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018, Global Ozone Research and Monitoring Project – Report No. 58. Geneva: WMO, 2018. 588 p.



Благодарю за внимание!