



Боровский А.Н., Арабов А.Я., Груздев А.Н.,
Еланский Н.Ф.,
Елохов А.С., Савиных В.В., Сенник И.А.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН

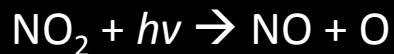


Измерения общего содержания двуокиси азота на Северном Кавказе

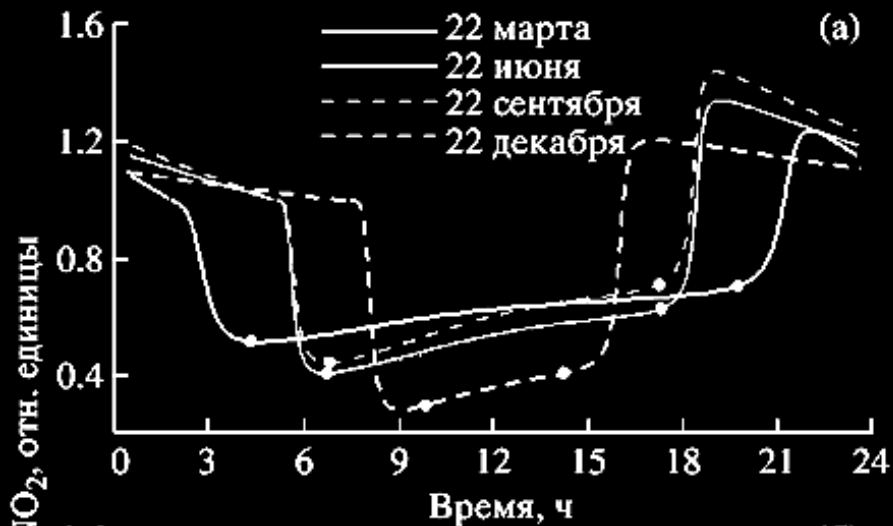
alexander.n.borovski@gmail.com



- Крутцен, 1970: участие оксидов азота в образовании и разрушении озона



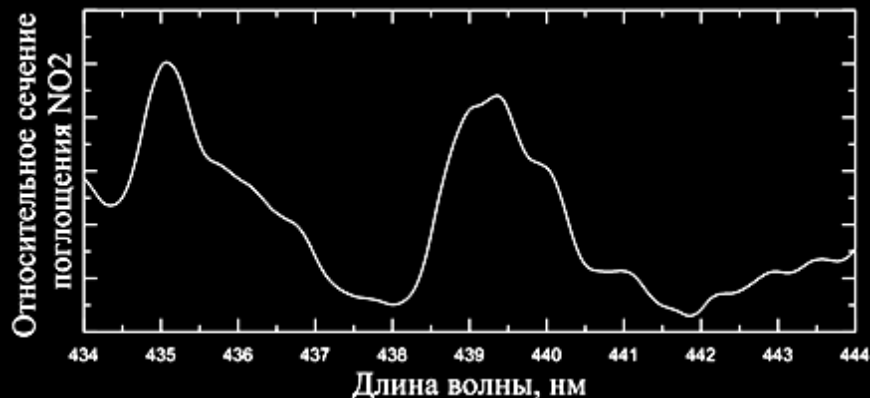
- Фотохимическое равновесие NO, NO₂ и O₃ в дневное время



Двуокись азота

- 1973 – Брюер
- 1975 – Ноксон
- 1977 – Кузнецов, Нигматулина

Восстановление ОС NO_2 во всем вертикальном столбе атмосферы (идентично измерениям озона)



Direct-DOAS

Солнечный свет

Верхняя атмосфера

ПСА

Прибор

Требования

- Большие зенитные углы (открытый горизонт)
- Полностью открытый солнечный диск

Первые наблюдения NO_2 :
по прямому солнечному излучению

Достоинства:

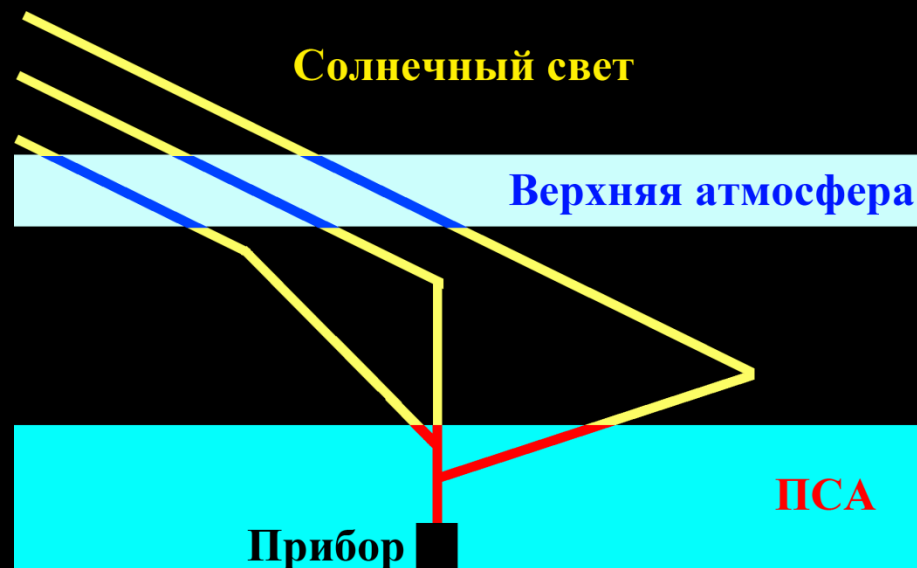
- Наблюдения в облачных и безоблачных условиях
- Более заполненные ряды наблюдений

Недостатки:

- Невозможность контролировать трассу
- Многократное рассеяние
- Рассеяние на аэрозолях
- Поляризация
- Решение обратной задачи с привлечением моделей атмосферы

Зенитный угол измерений $\sim 85-95^\circ$

Zenith-DOAS



Измерения NO_2 по рассеянной радиации

Zenith-DOAS

Сканирующий монохроматор МДР-23
Время записи спектра 25 с
Разрешение 0.8 нм
Запись диапазона длин волн 435-453 нм

Direct-DOAS

Сканирующий монохроматор МДР-3
Время записи спектра 25 с
Разрешение 0.4 нм
1981-2000 – запись 5 длин волн
2000-2008 – запись диапазона длин волн 435-453 нм

◆ Zenith-DOAS ◆ Direct-DOAS



- Уникальный по продолжительности ряд ОС NO_2 , полученный из измерений характеристик прямого солнечного излучения
- Уникальная возможность сравнения многолетних рядов данных ОС NO_2 , полученных по двум основным методикам наблюдения

Измерения ОС NO_2 на КВНС

- **Разработка методики** восстановления содержания малых газовых примесей атмосферы из спектров солнечного излучения и **восстановление ОС NO₂** из измерений характеристик прямого и рассеянного солнечного излучения
- **Анализ** характерных **особенностей** временной изменчивости ОС NO₂ по данным долговременных измерений спектров прямого солнечного излучения на Северном Кавказе
- **Сравнение рядов** ОС NO₂, полученных из измерений характеристик прямого и рассеянного солнечного излучения

Задачи

Измерение спектров

Восстановление
наклонного
содержания

Восстановление
вертикального
содержания

Закон Бугера, методика DOAS:

$$I(\lambda_k) = I_0(\lambda_k) \cdot \exp \left(- \sum_i \sigma_i(\lambda_k) \cdot X_i \right)$$

$I(\lambda_k)$ - измеренный спектр рассеянного
солнечного излучения;

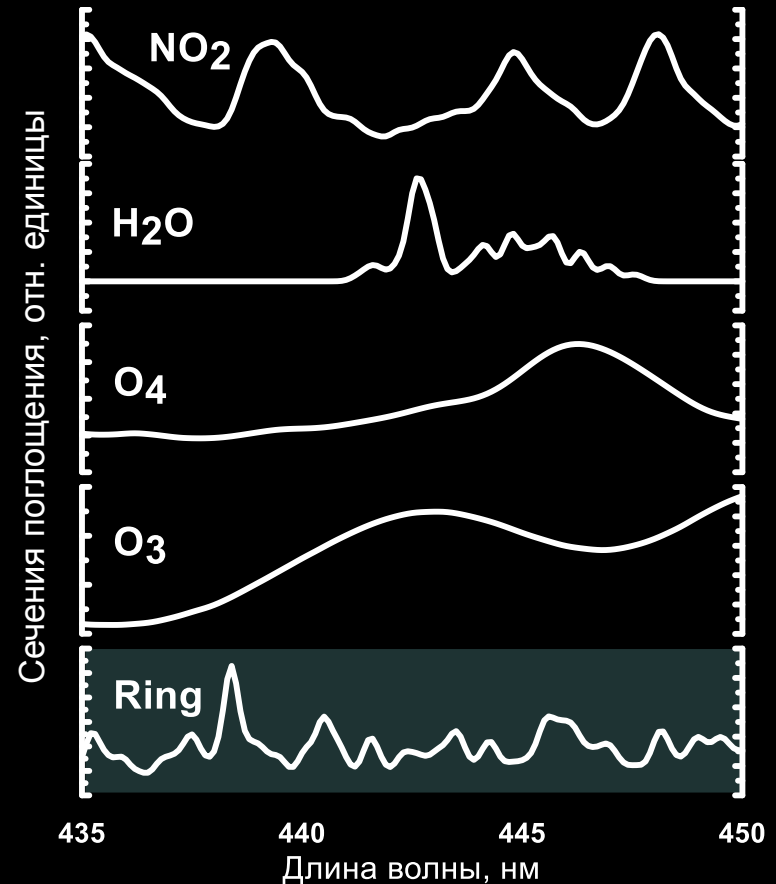
$I_0(\lambda_k)$ - опорный спектр;

$\sigma_i(\lambda_k)$ - спектр сечения поглощения
примеси;

X_i - содержание примеси в наклонном
столбе атмосферы.

$$X_i: \sum_k \left(\ln \left(\frac{I_0(\lambda_k)}{I(\lambda_k)} \right) - \sum_i \sigma_i(\lambda_k) \cdot X_i \right)^2 \rightarrow \min$$

$i = 0 \dots N$, N – количество длин волн



Методика восстановления содержания примеси в наклонном столбе атмосферы

$$VCD = \frac{SCD}{AMF}$$

VCD – содержание примеси в вертикальном столбе атмосферы;

SCD – содержание примеси в наклонном столбе атмосферы;

AMF – воздушная масса.

Измерения по прямой
солнечной радиации

$$AMF \approx \frac{1}{\cos(SZA)}$$

SZA – зенитный угол солнца

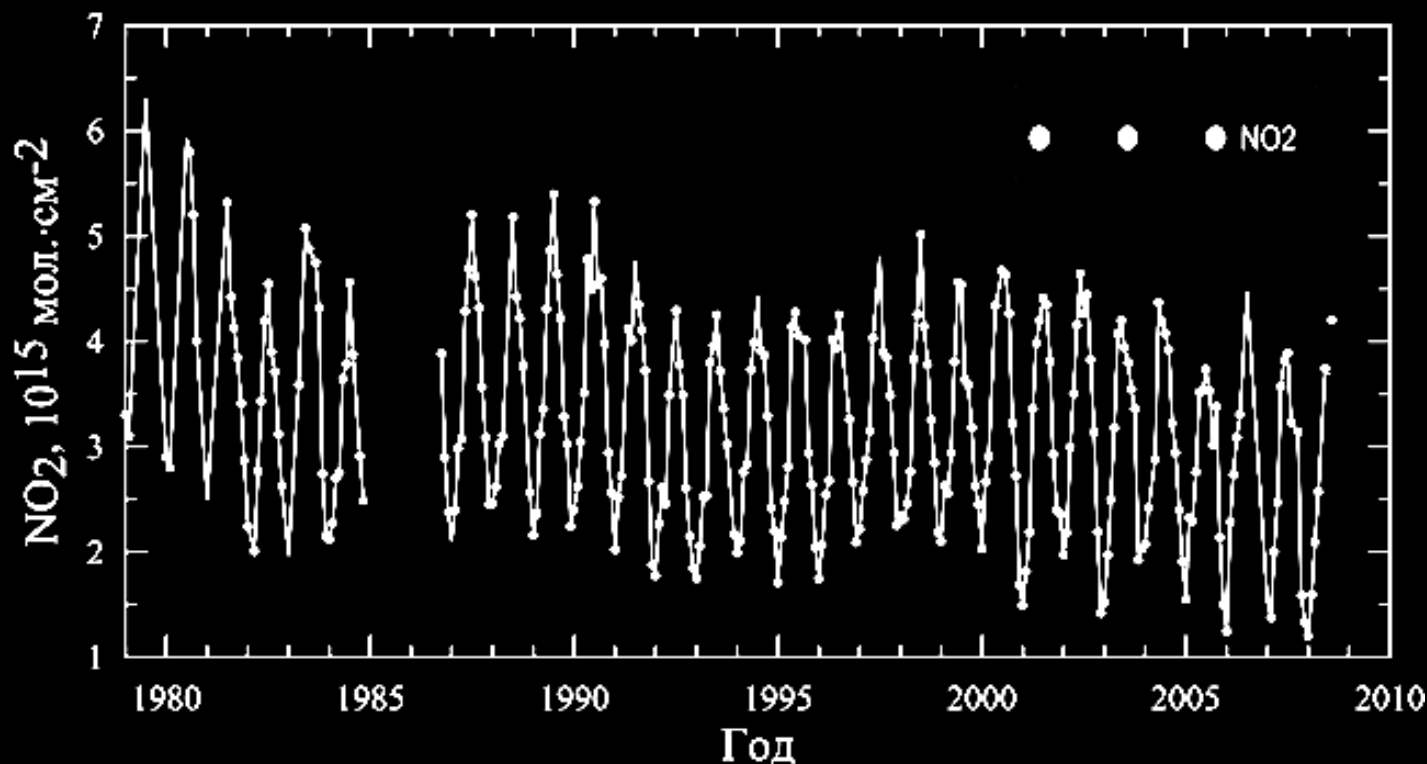
Измерения по рассеянной
солнечной радиации

$$AMF = \int_{h_0}^{h_1} a(h)n(h)dh$$

$a(h)$ - послойная воздушная масса (расчет по модели переноса излучения МСС++);

$n(h)$ - распределение концентрации примеси по высоте.

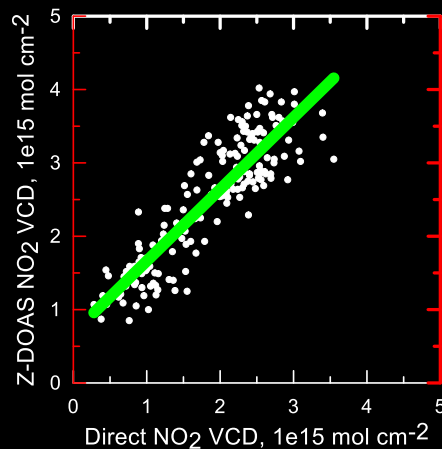
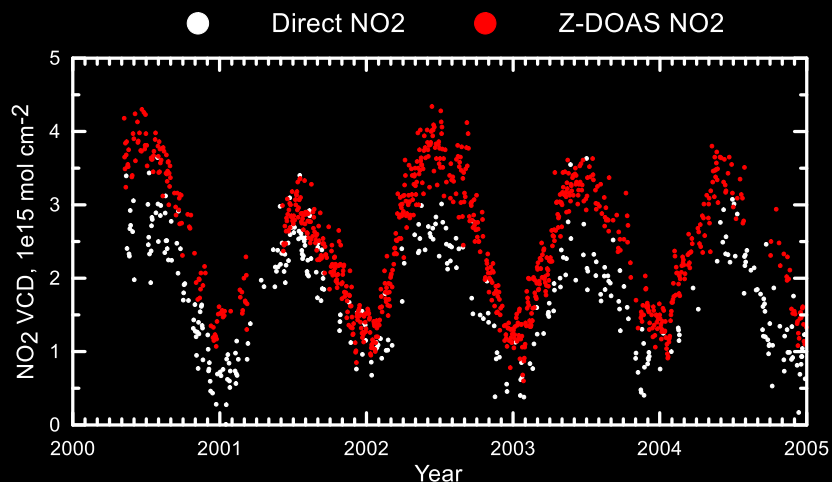
Восстановление вертикального содержания примеси в атмосфере



	Макс.	Мин.	Среднее	Стд.откл.	Медиана	Мода	Персентили		
							25%	75%	95%
Утро	6.5	0.1	3.12	1.11	3.06	3.18	2.33	3.97	4.90
Вечер	8.8	0.3	4.36	1.42	4.12	2.94	3.22	5.39	6.79
День	7.0	0.8	3.56	1.16	3.39	5.46	2.69	4.43	5.51

30-летний ряд ОС NO₂: прямое
солнечное излучение

$$VCD_{ZDOAS} = a + b \times VCD_{DIRECT}$$

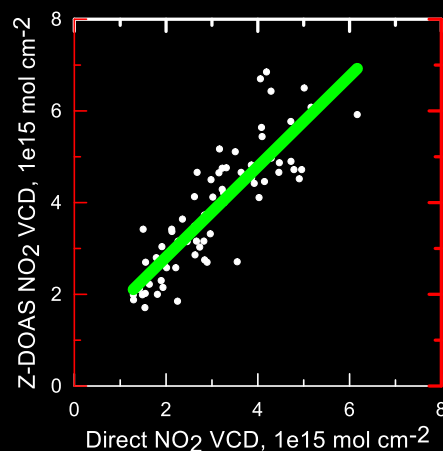
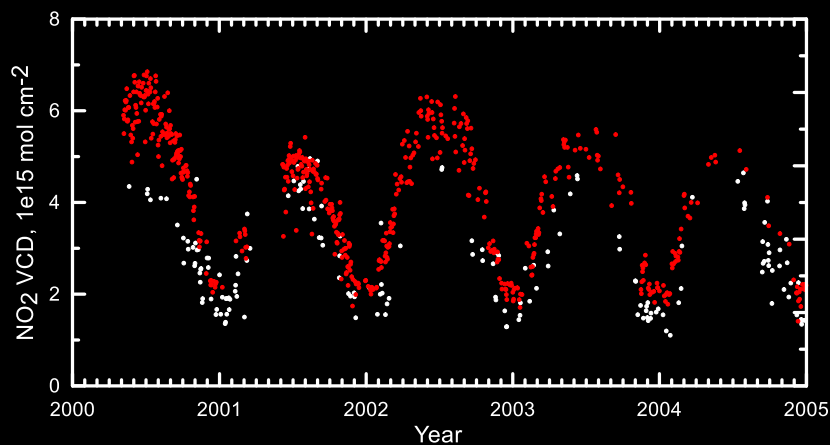


Утренние значения

N=187

$$A = 0.6555 \pm 0.1108^*$$

$$B = 0.9973 \pm 0.0611^*$$



Вечерние значения

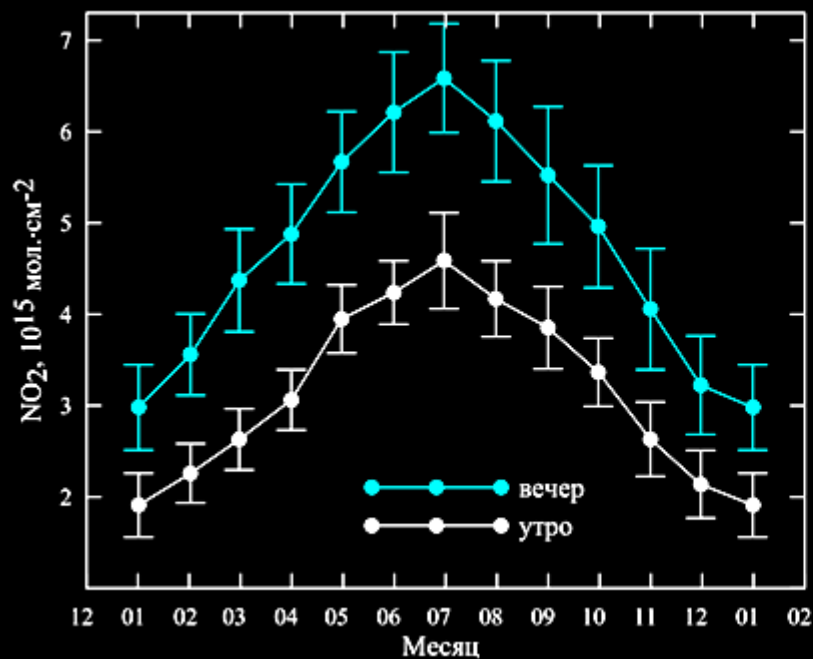
N=74

$$A = 0.8363 \pm 0.3339^*$$

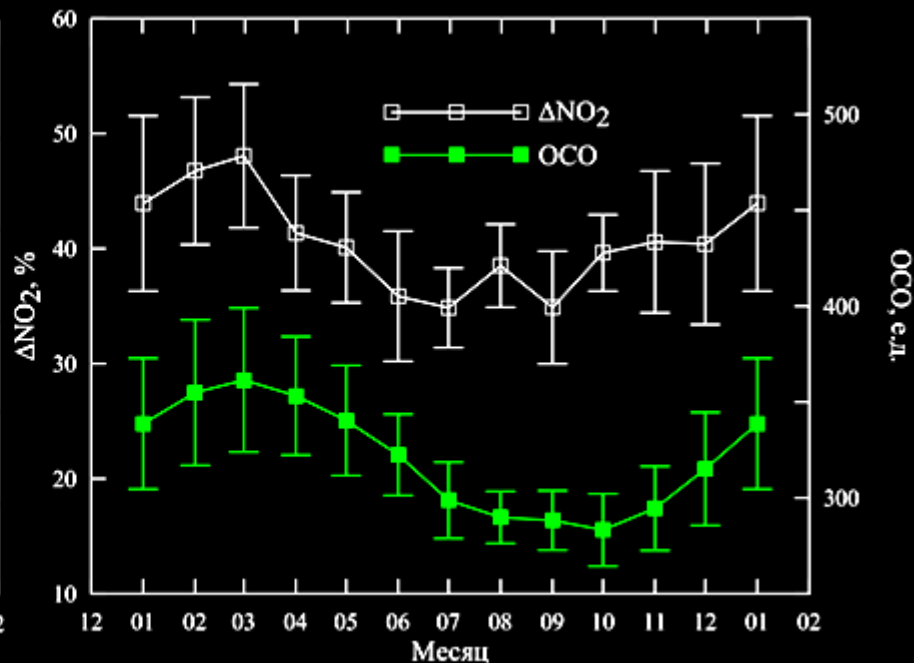
$$B = 0.9872 \pm 0.1088^*$$

*) доверительные интервалы даны для вероятности 95%

Сравнение ОС NO₂, полученных из измерений по
прямому и рассеянному солнечному излучению



Сезонный ход повторяет известные особенности сезонного хода NO₂ в средних широтах северного полушария



Сезонный ход разности вечерних и утренних значений NO₂ (из вечерних значений вычтены утренние). Корреляция сезонных ходов разности и OCO косвенно подтверждает состояние фотохимического равновесия между NO₂ и озоном на момент проведения наблюдений

Сезонный ход ОС NO₂

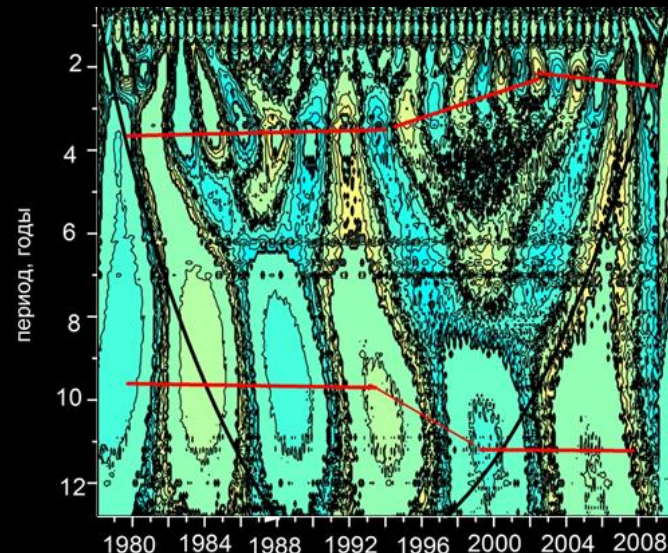
Регрессионная модель:

$$y(t_n) = a_0 + a_1 t_n + a_2 \Gamma(t_n) + a_3 I_{EF}(t_n) + a_4 U_{QBO}(t_n + t_{dQBO}) + a_5 I_{SO}(t_n + t_{dSO}) + a_6 V_P(t_n) + a_7 V_{EC}(t_n) + \varepsilon(t_n)$$

Параметризация влияния вулканических извержений

$$V(t_n) = \begin{cases} 0, t_n \leq T + t_d \\ \left[1 - \exp\left(-\frac{t_n}{\tau_{ox}}\right) \right] \exp\left(-\frac{t_n}{\tau_r}\right) (1 + g\gamma(t_n)), t_n > T + t_d \end{cases}$$

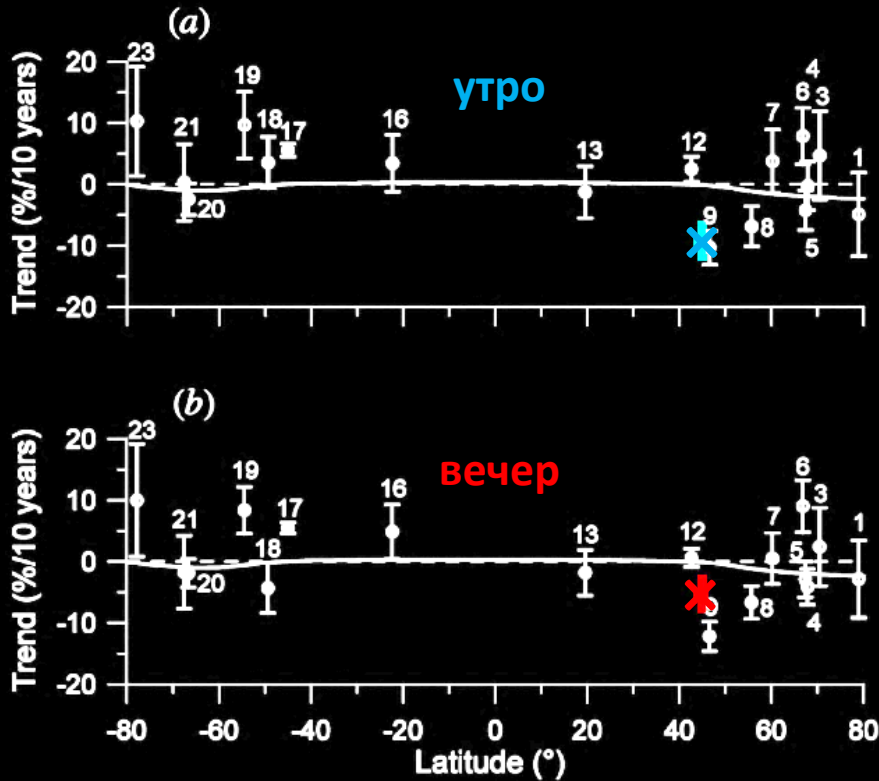
Gruzdev, A. N. (2009) 'Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂', *International Journal of Remote Sensing*, 30:15, 4227 — 4246



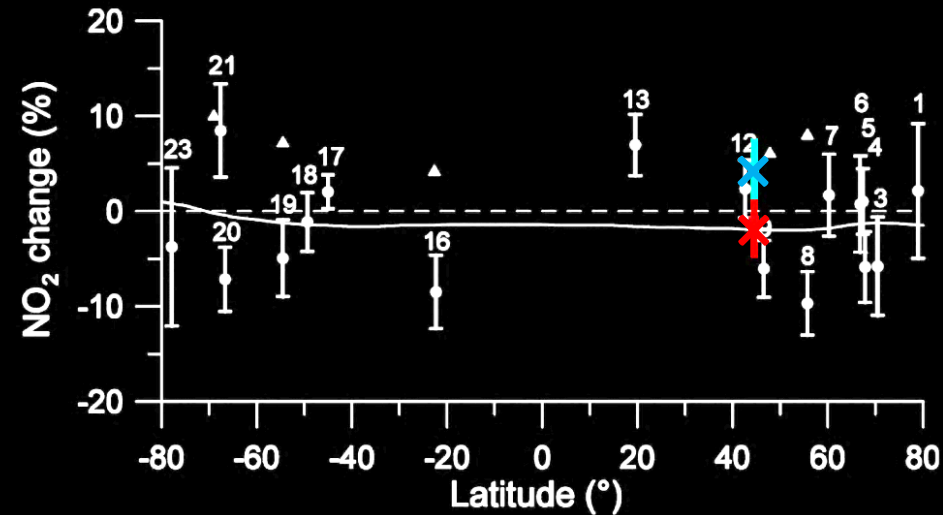
	Все сезоны		Зима		Весна		Лето		Осень	
	Утро	Вечер	Утро	Вечер	Утро	Вечер	Утро	Вечер	Утро	Вечер
Линейный тренд, %/10 лет	-10.80 1.78	-7.80 3.06	-19.90 2.73	-12.40 4.56	-6.97 1.79	-7.90 2.98	-9.02 1.33		-11.00 1.75	-6.90 3.06
Солнечная активность, %/100F	+4.76 2.50	-1.60 3.96	-0.50 2.50	-2.16 3.96	+3.28 2.50	+7.38 3.96	+9.05 2.50		+6.29 2.50	-3.28 3.96
КДЦ, %/10м/с	+1.38 0.63	+1.92 1.12	+4.85 0.98	+3.25 1.67	+1.68 0.64	+0.264 1.10	+0.62 0.47		+0.49 0.62	+2.46 1.12
ENSO, %	-0.14 0.11	+0.25 0.18	-0.00 0.17	+0.37 0.27	+0.05 0.11	+0.79 0.18	-0.06 0.08		-0.32 0.11	+0.24 0.18

Влияние солнечной активности и линейный тренд

Линейные тренды



Влияние солнечной активности



x - утро

x - вечер

Рисунки из: Gruzdev, A. N. (2009) 'Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂', *International Journal of Remote Sensing*, 30:15, 4227 — 4246

Сравнение значений линейных трендов и влияния солнечной активности

К	Дата	Название	Место
5	1980, май	Сент-Хеленс	46°12'N 122°11'W
5	1982, март	Эль-Чичон	17°21'N 93°13'W
6	1991, июнь	Пинатубо	15°07'N 120°21'Е
5	1991, август	Хадсон	74°33'S 99°42'Е

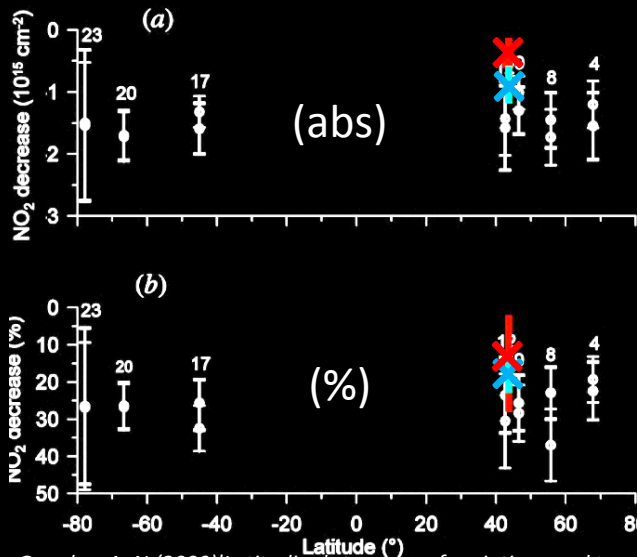
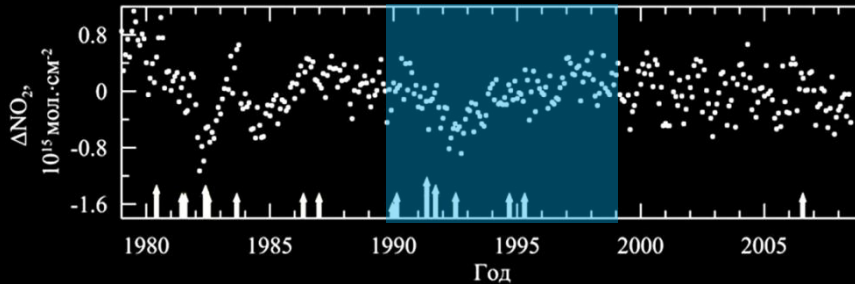
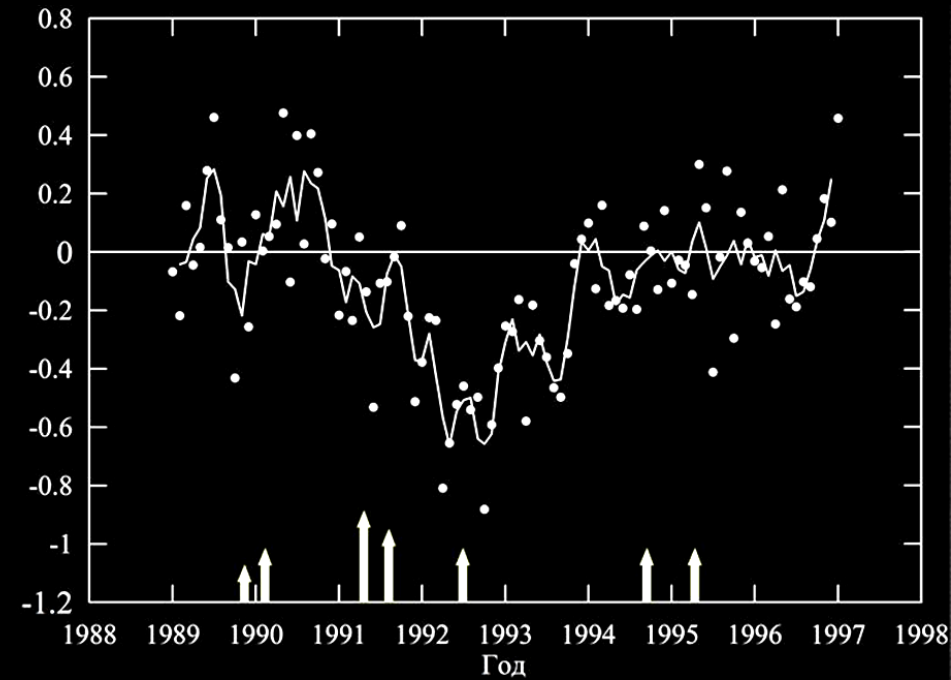


Рис. из: Gruzdev, A. N. (2009) 'Latitudinal structure of variations and trends in stratospheric NO₂', International Journal of Remote Sensing, 30:15, 4227 — 4246

- Начало уменьшения NO₂ через 4-5 месяцев после извержения
- Максимум уменьшения через 1 год – $0.85 \cdot 10^{15}$ мол/см² (~20%)
- Время восстановления NO₂ – 3 года
- Общая продолжительность влияния Пинатубо: 4 года



Влияние извержения Пинатубо

- Получены ряды ОС NO_2 из измерений характеристик солнечного излучения на КВНС:
 - уникальный по продолжительности ряд ОС NO_2 по прямому солнечному излучению с 1981 по 2008 гг;
 - важный для сравнения двух основных методик наблюдения ряд ОС NO_2 по рассеянному солнечному излучению с 2000 по 2005 гг.
- Проведен анализ характерных особенностей временной изменчивости ОС NO_2 по данным долговременных измерений спектров прямого солнечного излучения на Северном Кавказе.
- Проведено сопоставление ряда ОС NO_2 , полученного по прямому солнечному излучению, с рядами, полученными по рассеянному солнечному излучению:
 - сравнение с рядом ОС NO_2 по рассеянному солнечному излучению, полученному на КВНС;
 - характеристики ряда ОС NO_2 , полученного на КВНС по прямому солнечному излучению, сопоставлены с характеристиками рядов ОС NO_2 , полученных по рассеянному солнечному излучению на других станциях.

Заключение

Боровский Александр
Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН
alexander.n.borovski@gmail.com

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ