



Институт мониторинга
климатических и
экологических систем СО РАН



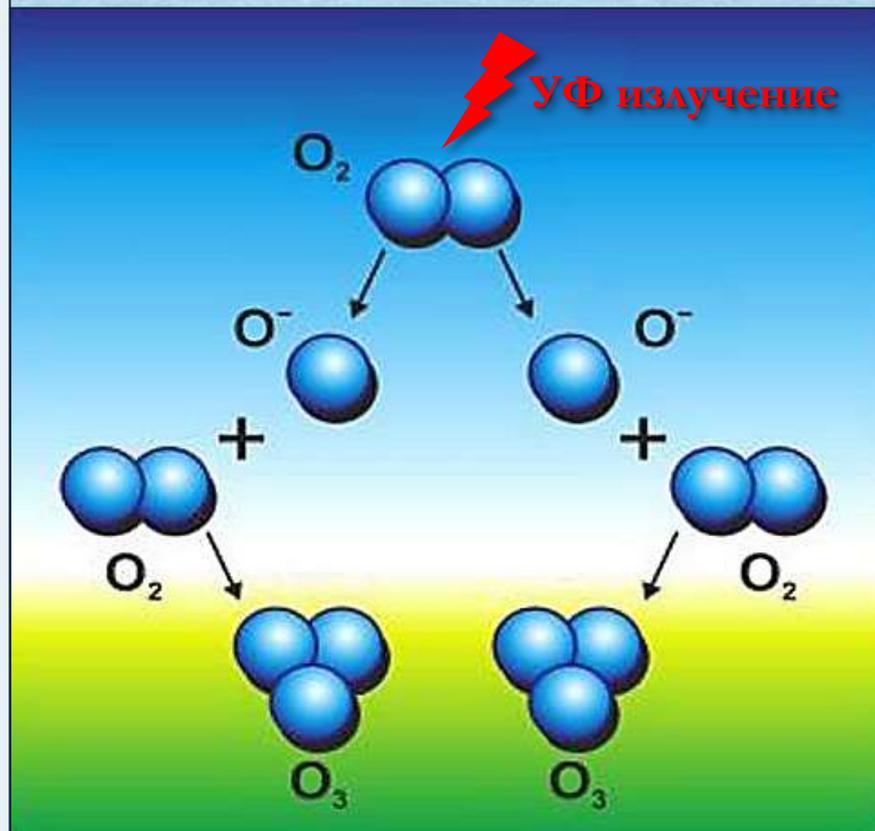
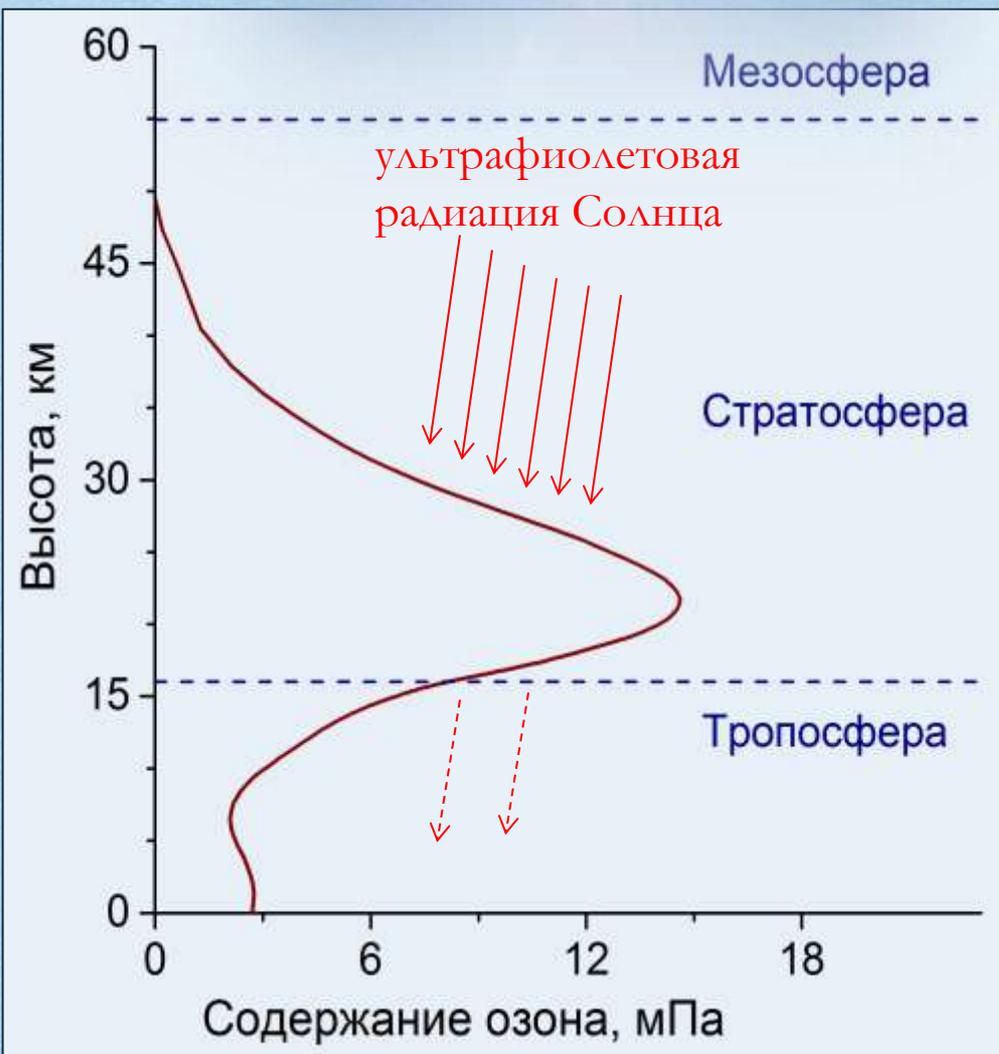
Томский политехнический
институт
Институт природных ресурсов

Вулканизм и озоновый слой Земли

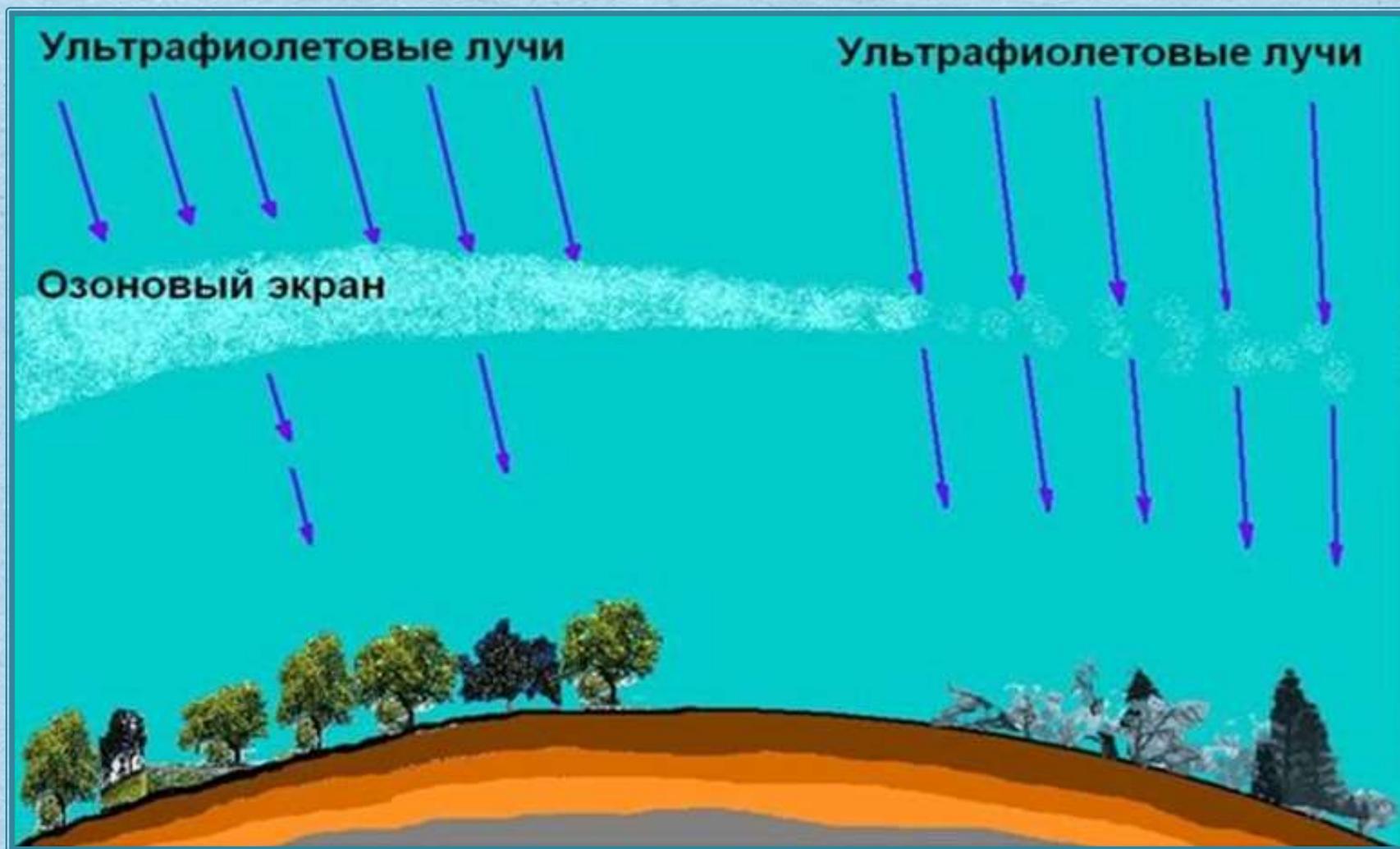
Член-корр. РАН, д.ф.-м.н., проф.
Зуев Владимир Владимирович

Томск, 6 сентября 2016 г.

Озоновый слой Земли



Негативные последствия разрушения ОЗОНОВОГО СЛОЯ



16 сентября

**Международный день охраны
озонового слоя**

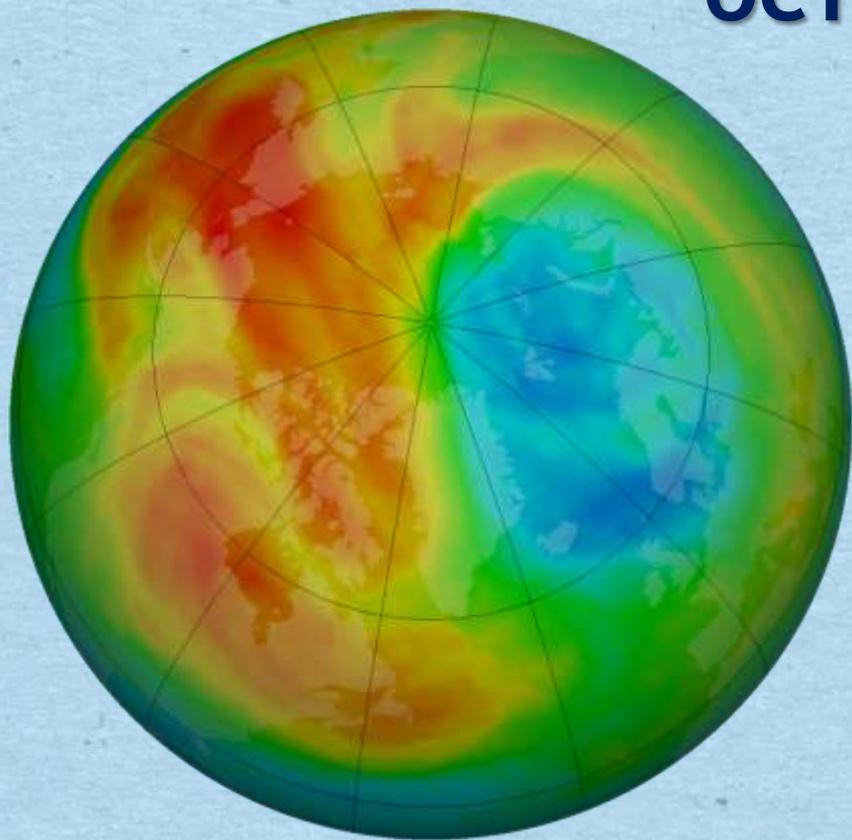
**связан с датой
подписания**

Монреальского протокола

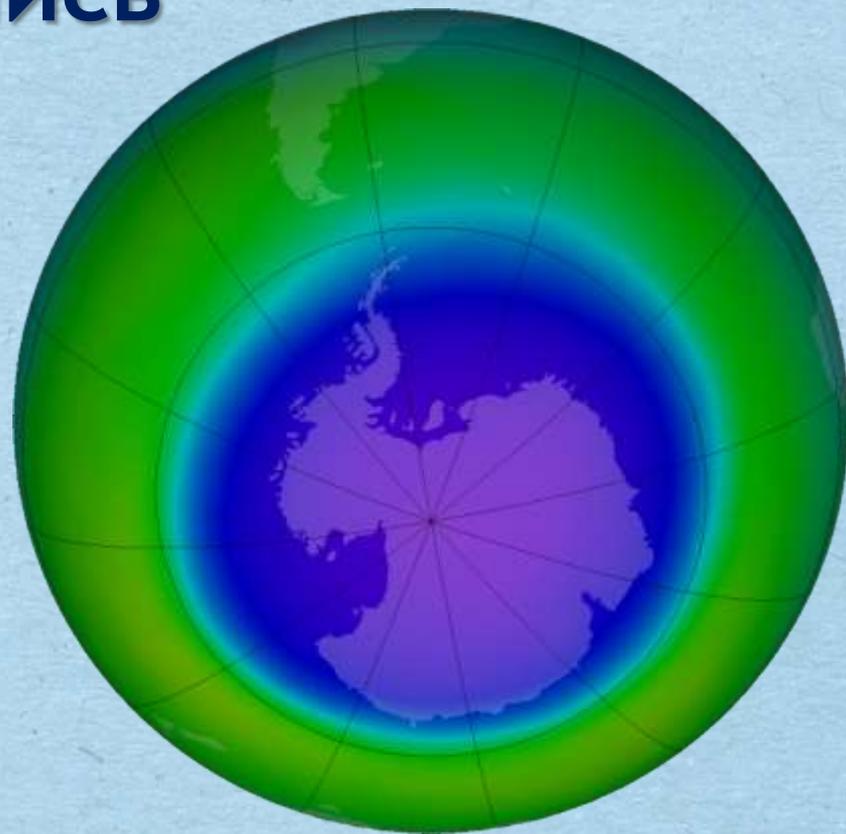
Этапы ангажированной компании по дискредитации фреонов

- 70-е гг. - рынок фреонов насытился, спрос упал, а вместе с ним упали доходы основного производителя, компании DuPont.
- Начало 80-х гг. - компании DuPont, ICI и Alf Atochem завершили создание технологий производства новых химических соединений гидрофторуглеродов (ГФУ) и хладагентов и пропеллентов на их основе
- 1985 г. - принята Венская конвенция об охране озонового слоя
- 1985 г. - в журнале Nature опубликована статья о наблюдениях озоновой дыры над Антарктидой и ее связи с хлорфторуглеродами (ХФУ), фреонами
- 1987 г. - подписан Монреальский протокол (инициатор компания DuPont)
- 1990 г. - введено полное торговое эмбарго в отношении фреона
- 1995 г. - вручена Нобелевская премия по химии за недоказанную «фреоновую» гипотезу разрушения озона
- 2000 г. - осуществлен полный запрет фреоновых технологий
-
- В итоге - ТНК DuPont, ICI и Alf Atochem стали монополистами на рынке ГФУ, бывшие производители фреонов получили многомиллиардные убытки, РФ покупает ГФУ у компании DuPont уже с 1996 г.

Фреоны запретили, а проблемы остались



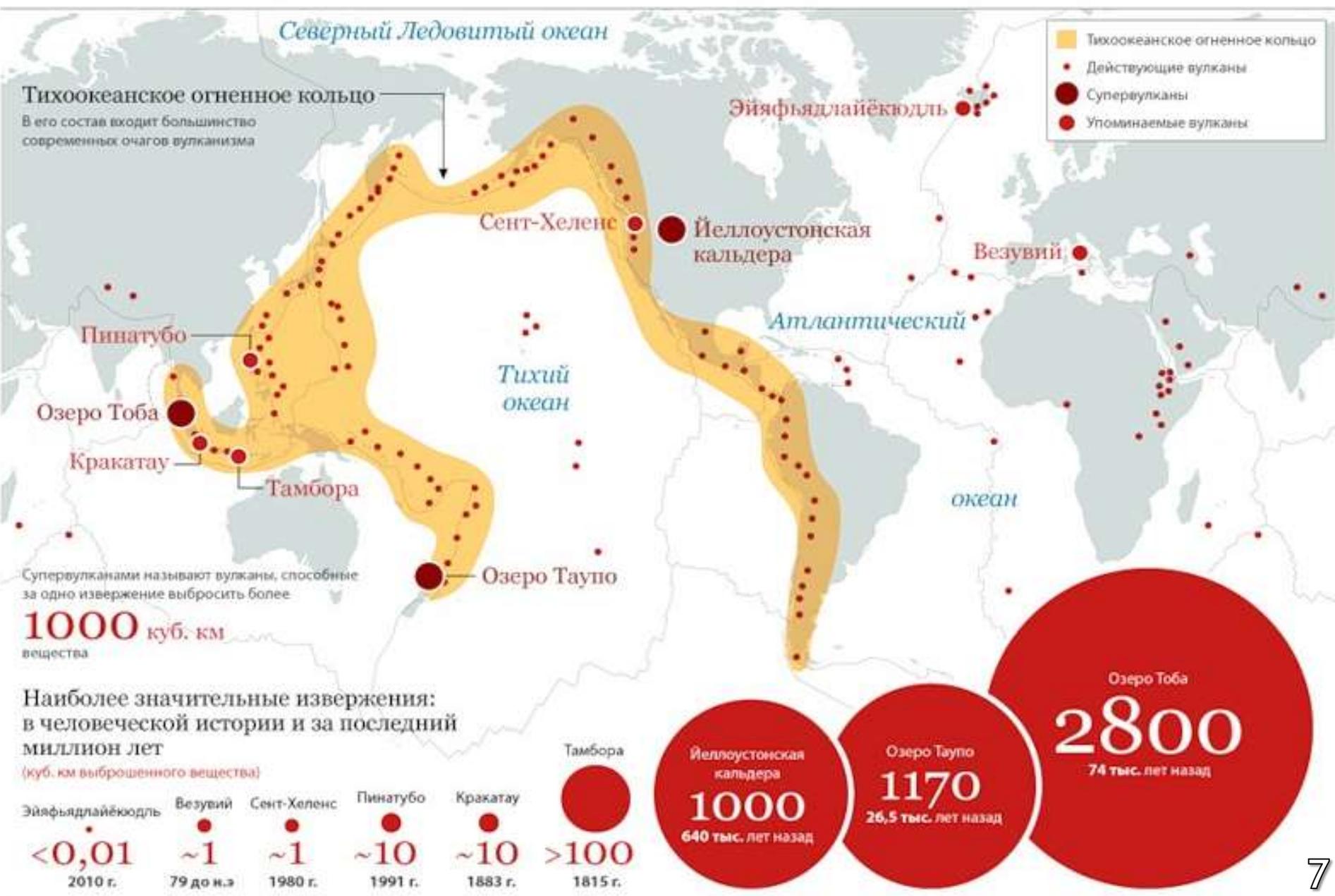
Озоновая дыра в Арктике
март, 2011 г.



Озоновая дыра в Антарктиде
октябрь, 2015 г.

Goddard Space Flight Center (GSFC). NASA's Ozone Hole Watch Web Site
(online database). <http://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/SH.html>

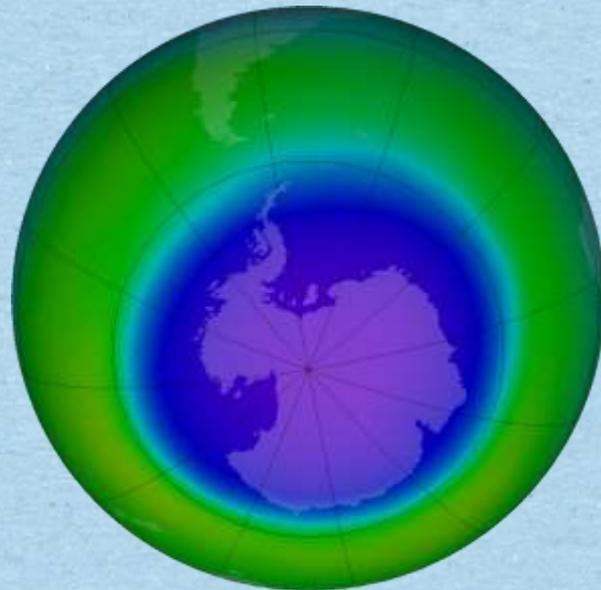
Вулканы Земли



Характеристика индексов вулканической взрывчатости (VEI)

VEI	Объем, км ³	Высота выброса, км	Тип извержения	Частота извержений	Пример
0	10 ⁻⁵	<0,1	Гавайский	ежедневно	Килауе
1	10 ⁻⁴	0,1-1	Гавайский/ Стромболианский	ежедневно	Стромболи
2	10 ⁻³	1-5	Стромболианский/ Вулканианский	Каждую неделю	Галерас, 1992
3	10 ⁻²	3-15	Вулканианский	ежегодно	Суффриер, 1979
4	10 ⁻¹	10-25	Вулканианский/ Плинианский	1 раз в 10 лет	Галангунг, 1982
5	1	>25	Плинианский	1 раз в 100 лет	Эль-Чичон, 1982
6	10	>25	Плинианский/ Ультра Плинианский	1 раз в 100 лет	Пинатубо, 1991
7	100	>50	Ультра Плинианский	1 раз в 1000 лет	Тамбора, 1815
8	>1000	>50	Ультра Плинианский	1 раз в 10000 лет	Тоба, 74 тыс. лет назад

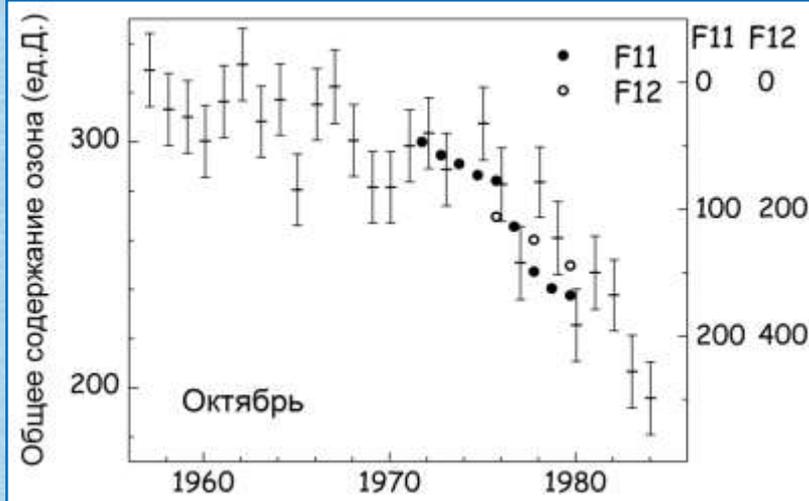
Роль вулкана Эребус в усилении Антарктической озоновой дыры



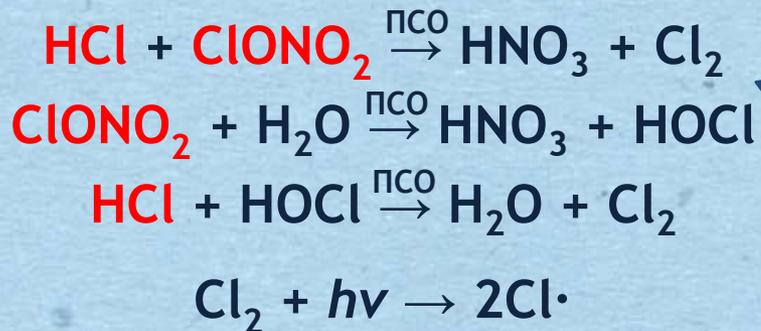
Хлорный каталитический цикл

Полярная стратосфера

Farman, Gardiner, Shanklin, 1985



Ключевые гетерогенные реакции



Тропическая стратосфера

Хлорфторуглероды (CFCs)



Хлорный цикл



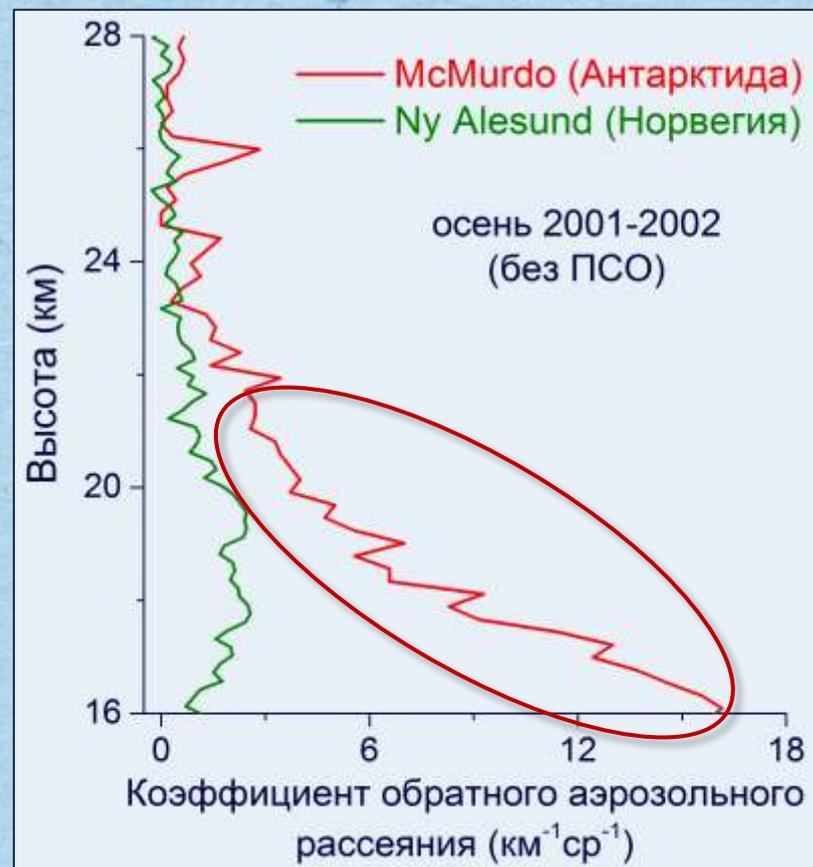
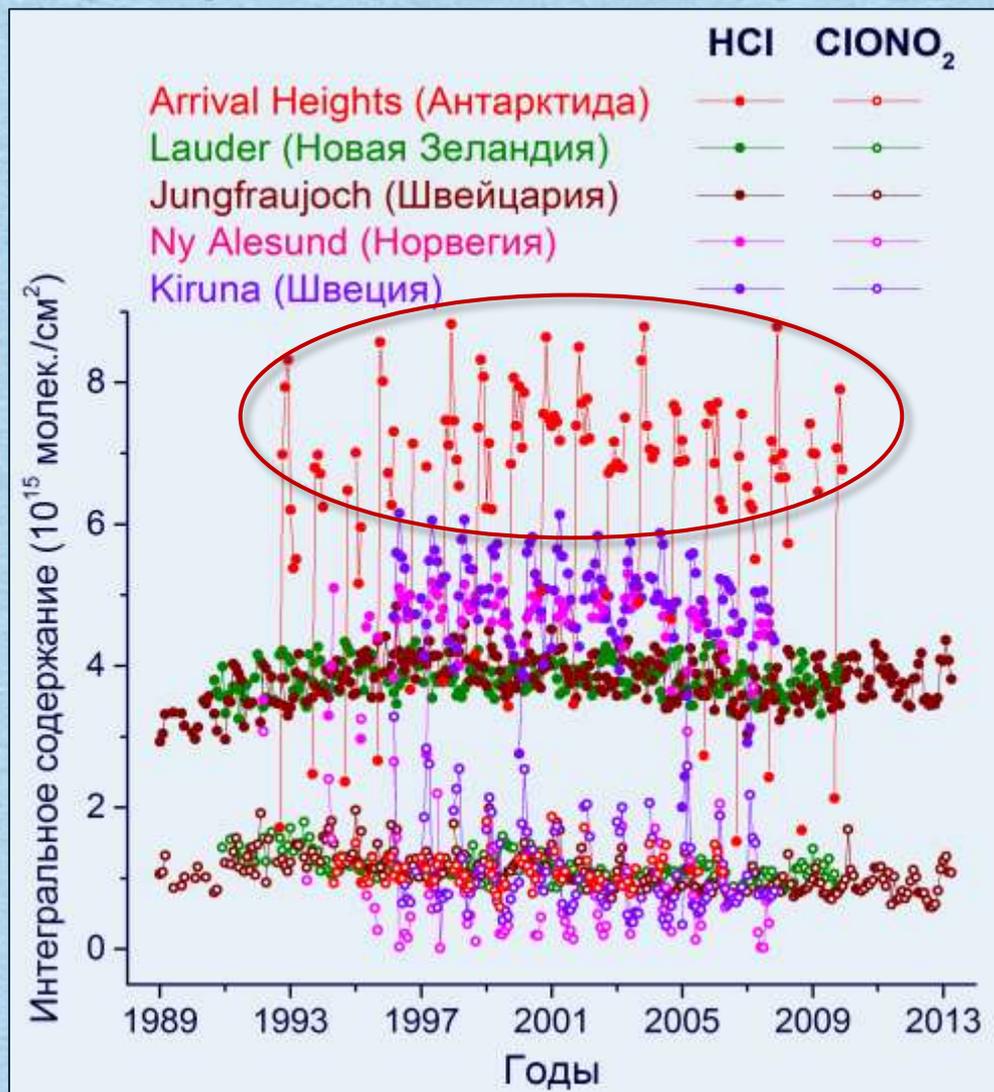
Блокирующие реакции



Транспорт к полюсу

Solomon S., Garcia R.R., Rowland F.S., Wuebbles D.J., 1986. On the depletion of Antarctic ozone. Nature, 321, 755-758.

Интегральное содержание HCl и ClONO₂. Аэрозольный профиль над Антарктикой и Арктикой



Вулкан Эреббус, остров Росса, Антарктида



77,5° ю.ш., 167,2° в.д.
Высота - 3794 м



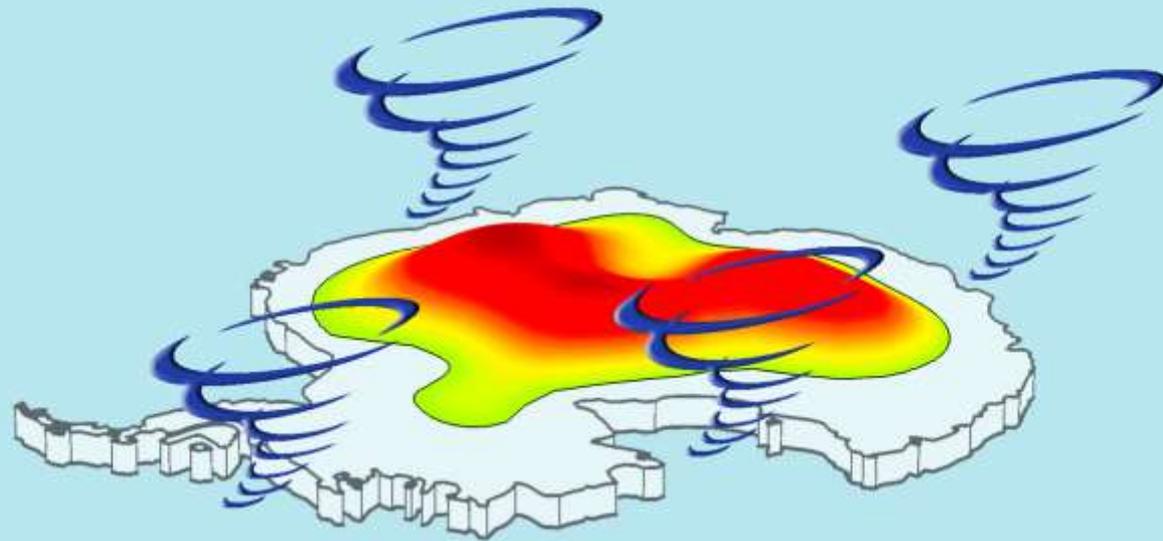
Скорость эмиссии

$\text{SO}_2 \sim 82$ т/сут.

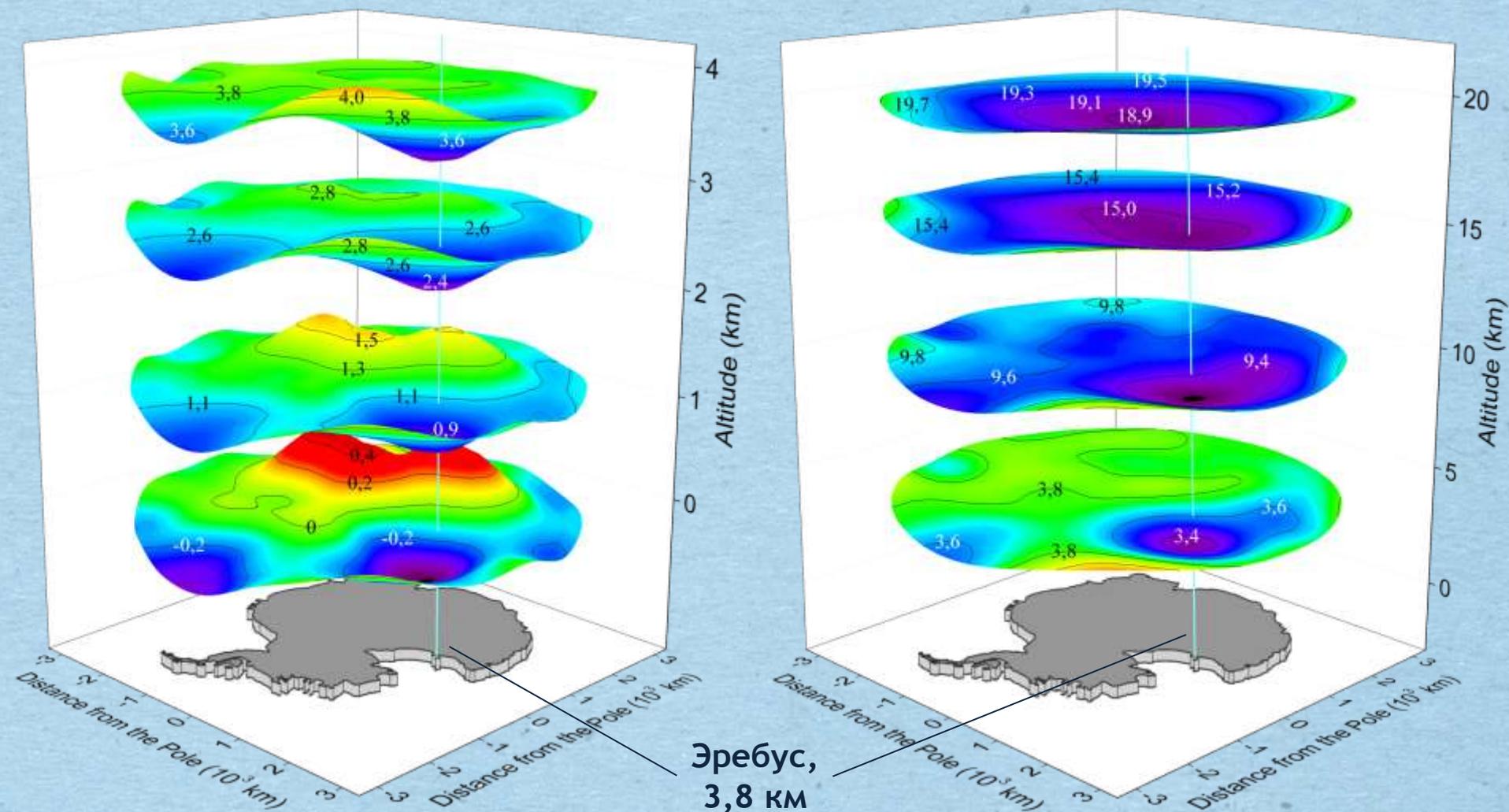
$\text{HCl} \sim 26$ т/сут.

$H_{\text{max}} \sim 2$ км

Формирование и динамика высоких циклонов у побережья Антарктиды



Высокий циклон над о-вом Росса

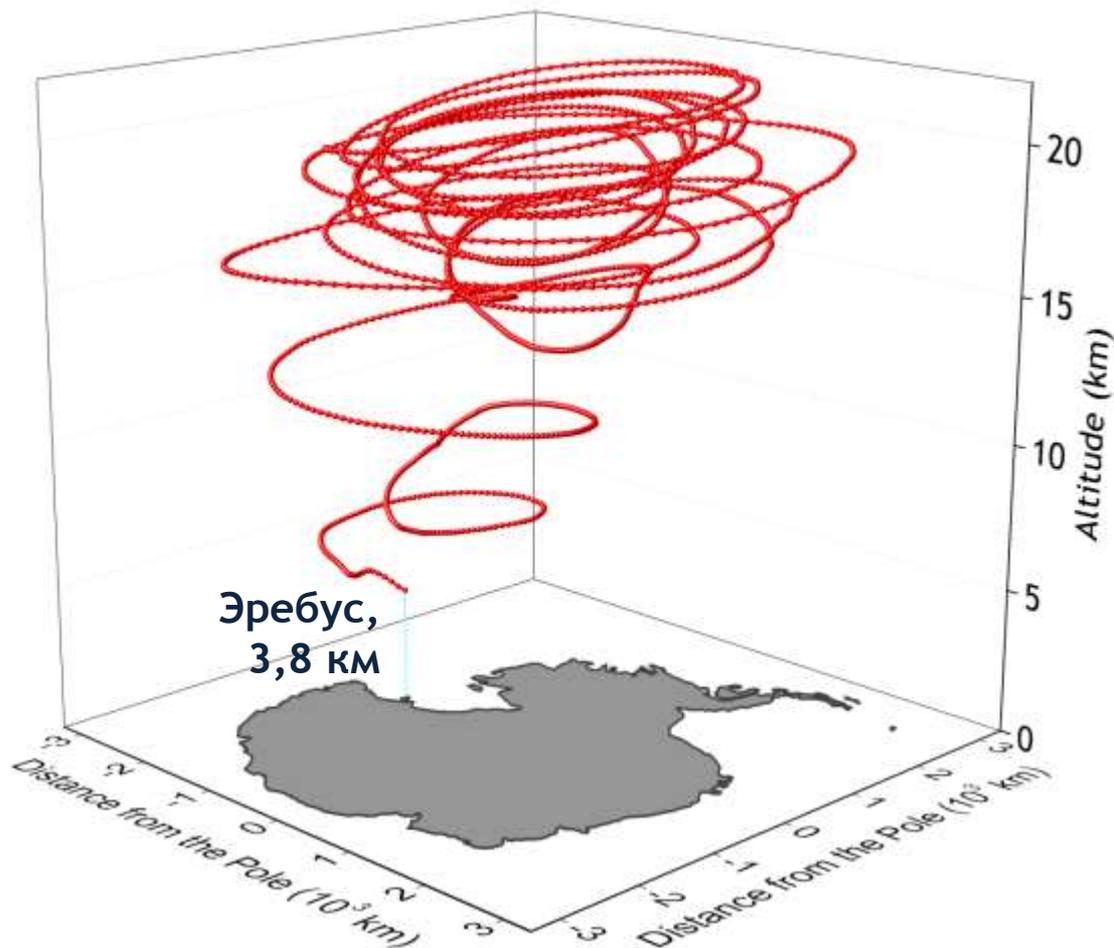
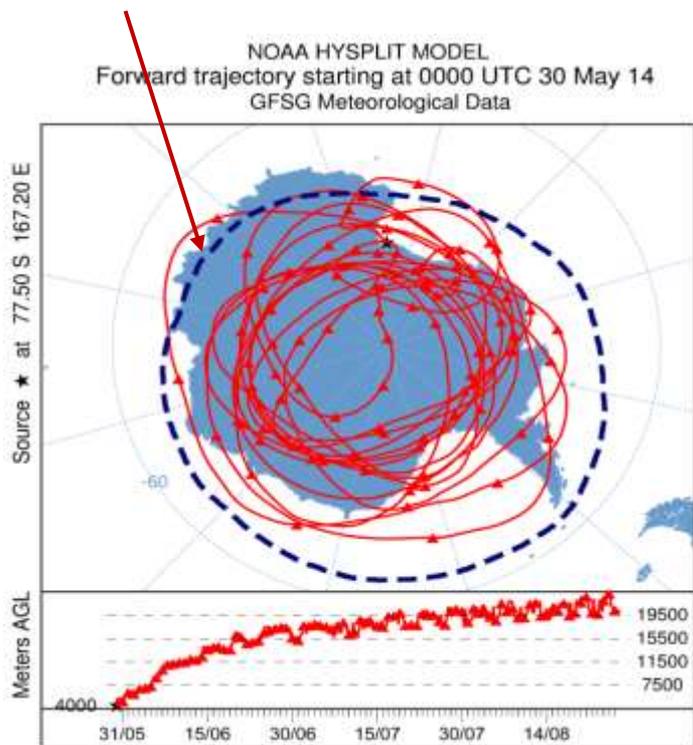


NCEP/NCAR global reanalysis

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Траектория движения воздушных масс в циклоне, рассчитанная по модели NOAA HYSPLIT

Озоновая дыра
Сентябрь 2014



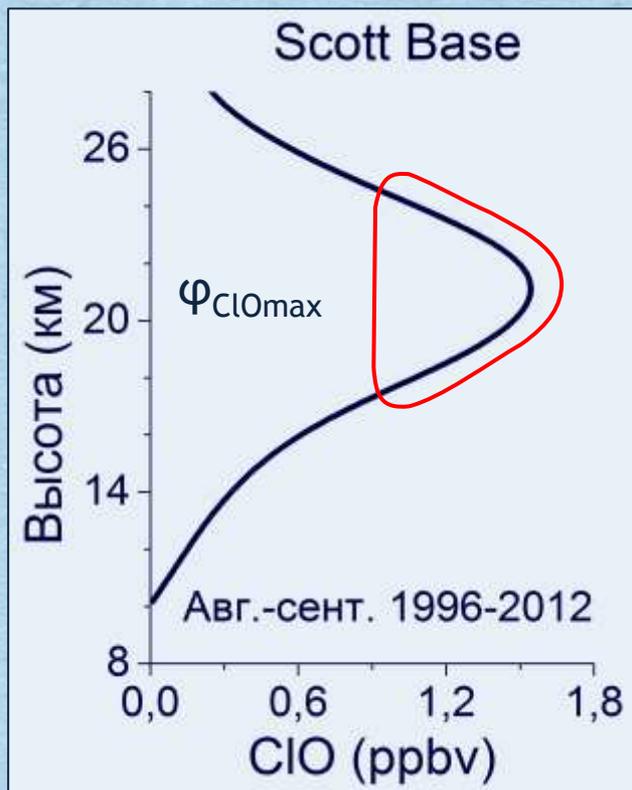
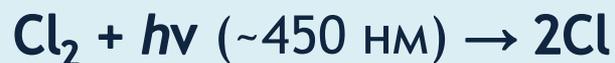
Оценка массы HCl, переносимой циклонами в стратосферу от вулкана Эребус

Анализ на основе ежедневных полей геопотенциальной высоты за 35 лет

Вероятность существования циклона над о-вом Росса –	32,5%
Вероятность циклонального подъема –	72,2%
Среднегодовая вероятность перемещения выбросов вулкана Эребус в стратосферу –	23,5%
Масса HCl, выбрасываемого вулканом Эребус –	4,1–60,9 кт/год
Масса HCl, переносимого в антарктическую стратосферу в высоких циклонах –	1,0–14,3 кт/год

Анализ основан на данных NCEP/NCAR global reanalysis
<http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>

Оценка массы HCl, необходимой для формирования озоновой дыры

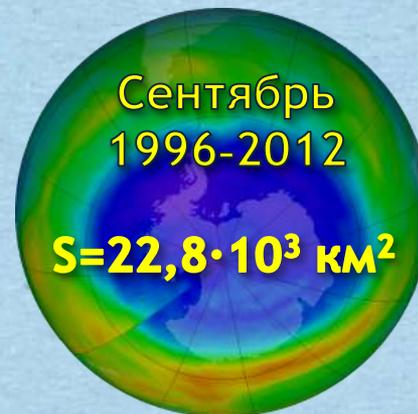


$$\nu_{\text{HCl}} = 0,5\nu_{\text{ClO}}; \nu_{\text{HCl}}/\nu_{\text{ClO}} = \varphi_{\text{HCl}}/\varphi_{\text{ClO}}$$

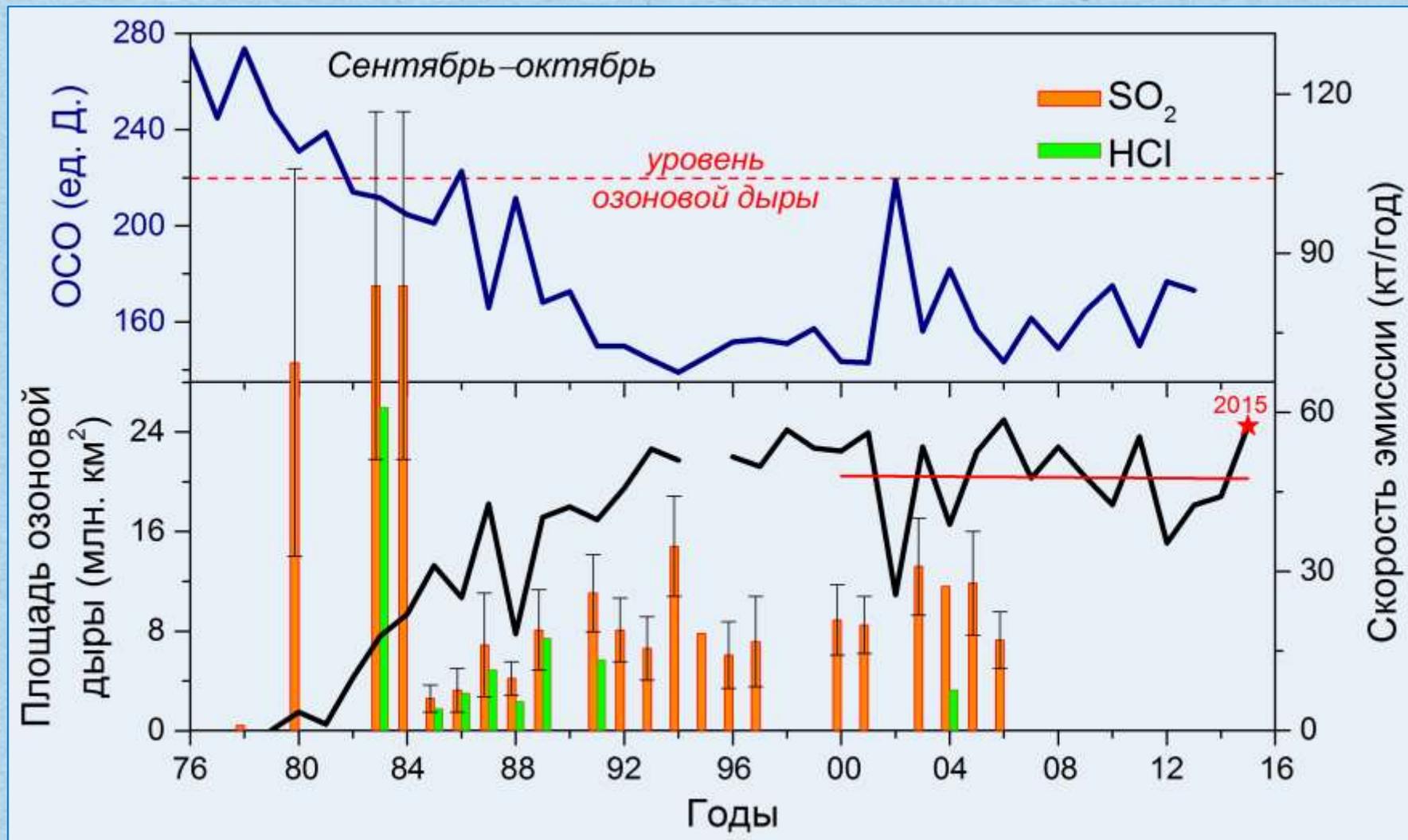
$$\varphi_{\text{ClOmax}} = 1,55 \cdot 10^{-9}$$

$$C_{\text{HCl}} = \frac{\varphi_{\text{ClO}} M_{\text{HCl}} P_{\text{air}}}{2 R T_{\text{air}}} = 8,24 \cdot 10^{-8} \text{ g/m}^3$$

$$m_{\text{HCl}} = C_{\text{HCl}} V_{\text{O-hole}} = 11,3 \text{ кт}$$



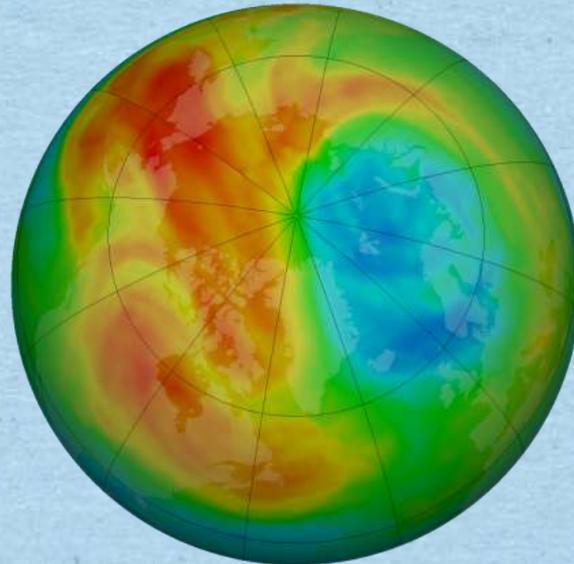
Усиление антарктической озоновой дыры при увеличении активности вулкана Эребус



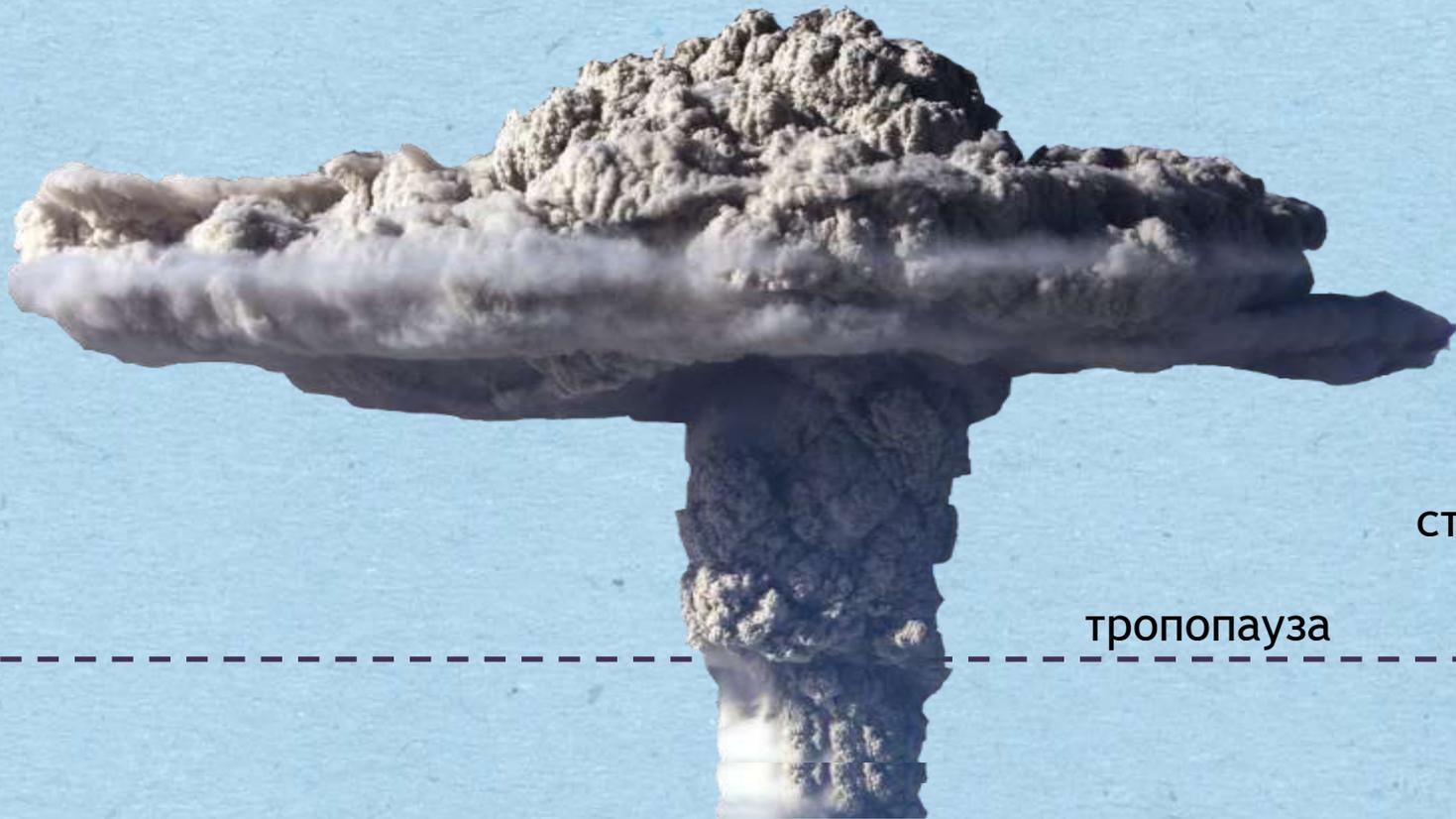
Выводы по разделу I

- ✓ Основным источником химических реагентов, ответственных за разрушение стратосферного озона над Антарктидой, являются отнюдь не фреоны, а вулкан Эребус;
- ✓ Аномально высокая активность вулкана Эребус в начале 80-х определила рост озоновой дыры над Антарктидой;
- ✓ Масштабы антарктической озоновой дыры сохраняются, пока продолжается активность вулкана Эребус.

Влияние вулканогенного возмущения тропической стратосферы на формирование озоновой дыры в Арктике



Газопепловая колонна в стратосфере

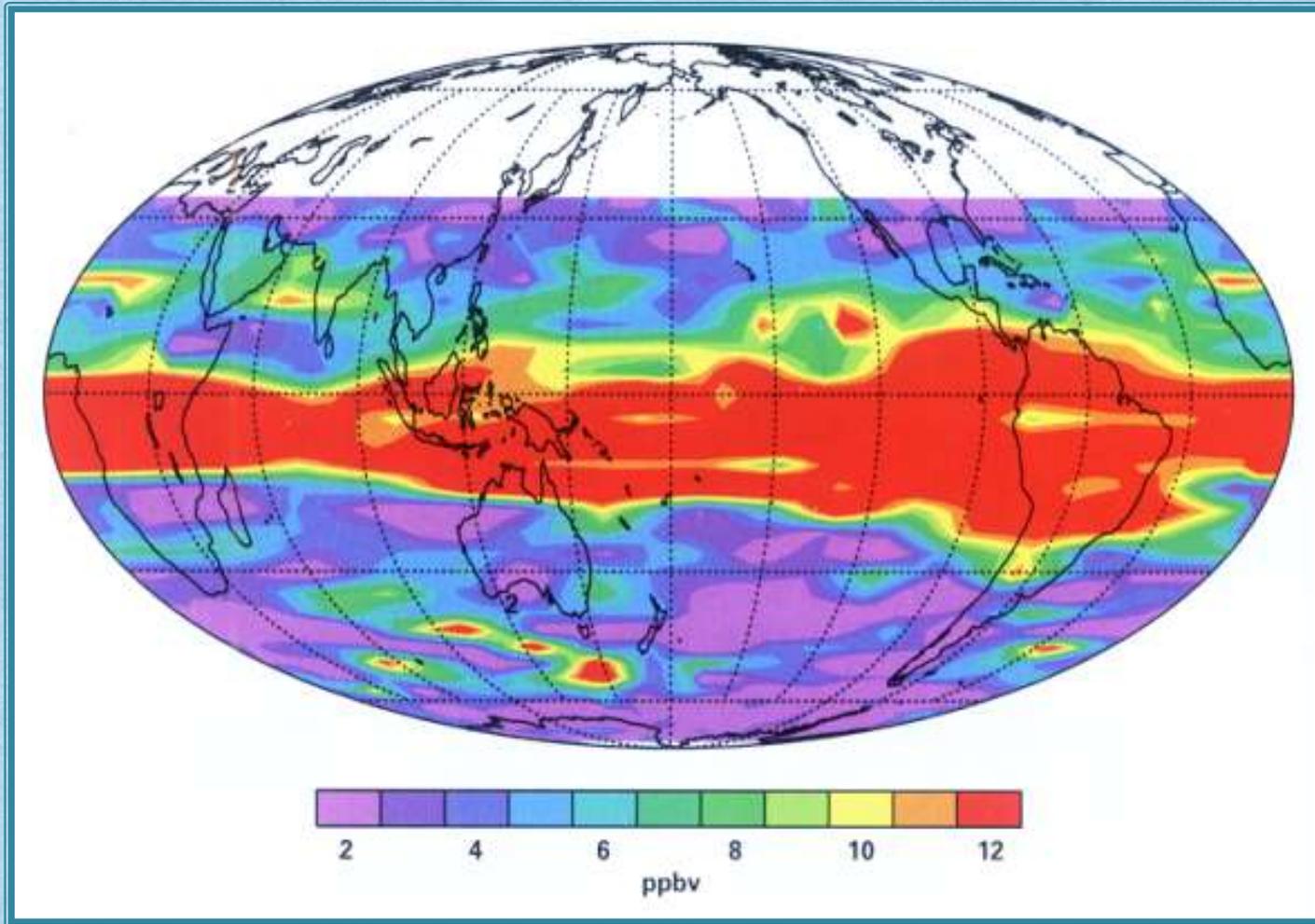


стратосфера

тропопауза

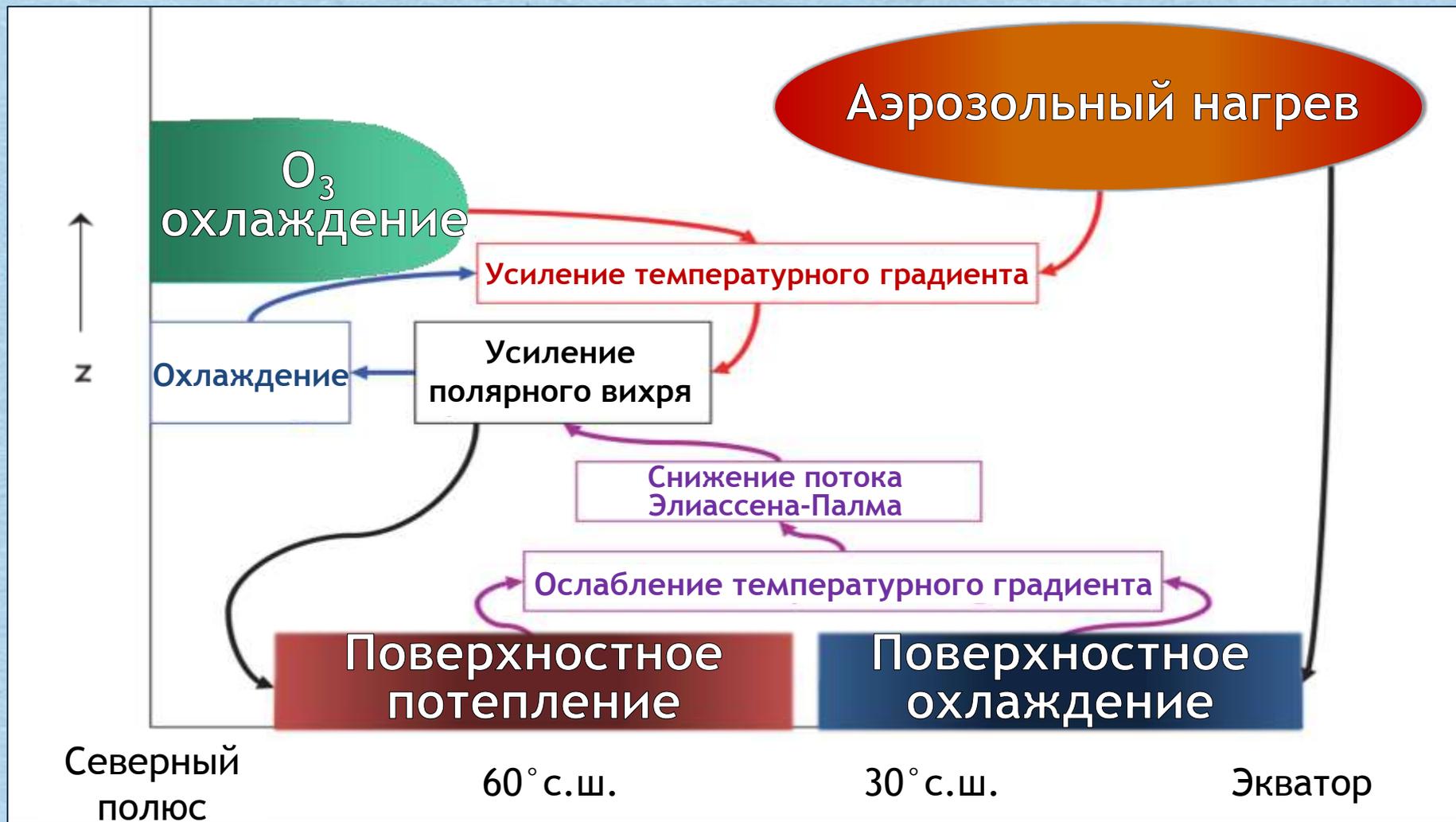
тропосфера

Распределение SO_2 в стратосфере после извержения вулкана Пинатубо (июнь, 1991)

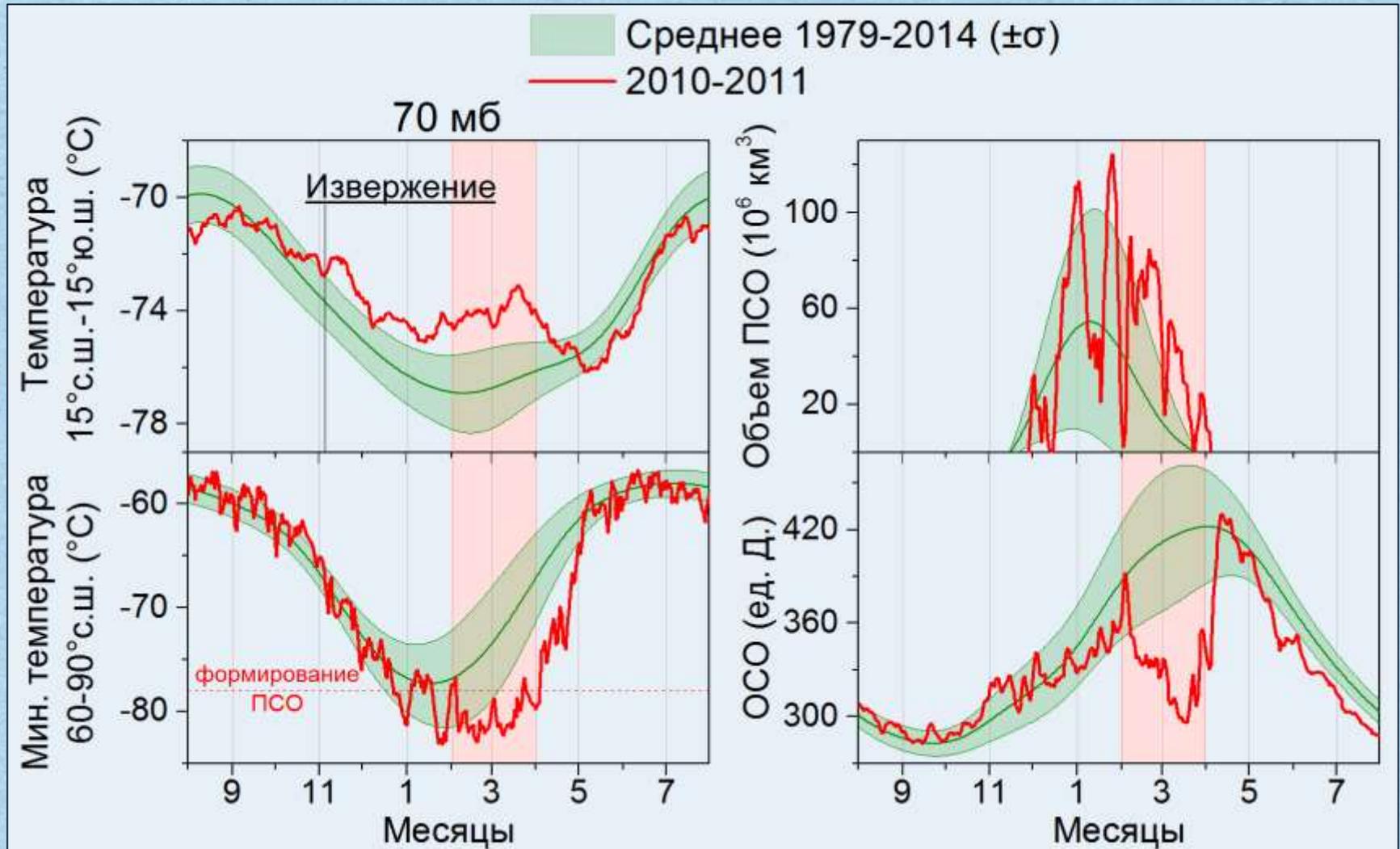


20 МТ SO_2 → 30 МТ H_2SO_4

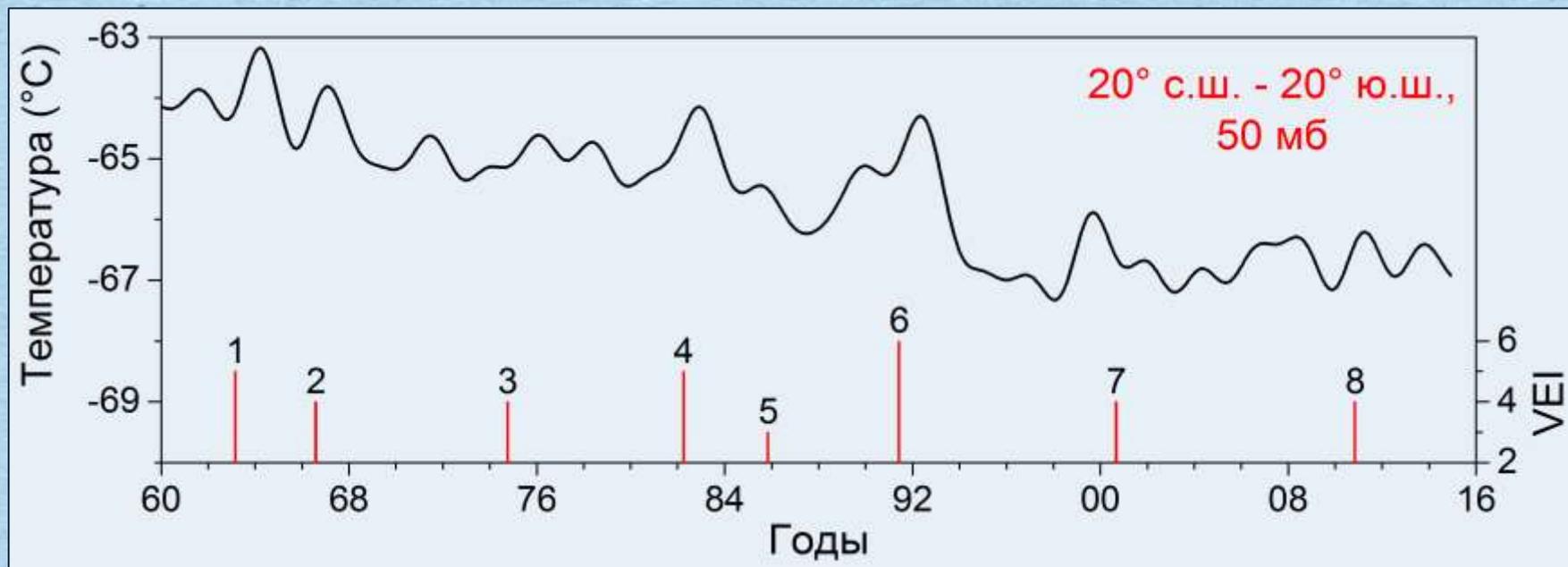
Влияние аэрозольного возмущения тропической стратосферы на циркуляцию



Арктическая озоновая аномалия после извержения вулкана Мерапи



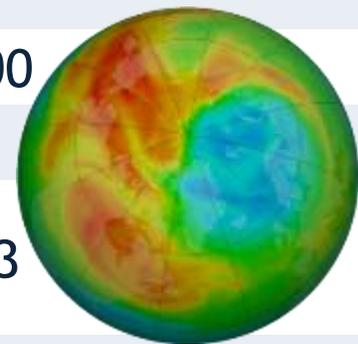
Потепление тропической стратосферы после крупных вулканических извержений



N	Дата извержения	Название вулкана	VEI	H (км)
1	17 март 1963	Агунг	5	25
2	12 авг. 1966	Аву	4	
3	17 окт. 1974	Фуэго	4	24
4	03 апр. 1982	Эль-Чичон	5	31
5	13 нояб. 1985	Дель Руиз	3	31
6	15 июнь 1991	Пинатубо	6	35
7	29 сент. 2000	Улаун	4	17,3
8	4-5 нояб. 2010	Мерапи	4	18,3

Связь озоновых аномалий в Арктике с извержениями тропических вулканов

Дата извержения	Название вулкана	VEI	Высота	Арктические озоновые аномалии
Апр. 1982	Эль-Чичон	5	31 км	январь-февраль 1983, февраль 1984
Ноябрь 1985	Дель Руиз	3	31 км	январь-март 1986, январь 1987
Июнь 1991	Пинатубо	6	35-40 км	январь 1992, февраль-март 1993
Сентябрь 1994	Рабаул	4	21 км	март 1995
Сентябрь 1996	Суфриер Хиллс	3	15 км	март-апрель 1997
Октябрь 1999	Гуагуа-Пичинча	3	20 км	февраль-март 2000
Сентябрь 2000	Улаун	4	17,3 км	январь-февраль 2003
Сентябрь 2002	Руанг	4	17 км	
Ноябрь 2002	Ревентадор	4	20,5 км	
Ноябрь 2004	Манам	4	18 км	январь-февраль 2005
Октябрь 2006	Рабаул	4	18 км	март 2007
Ноябрь 2010	Мерапи	4	18,3 км	февраль-март 2011

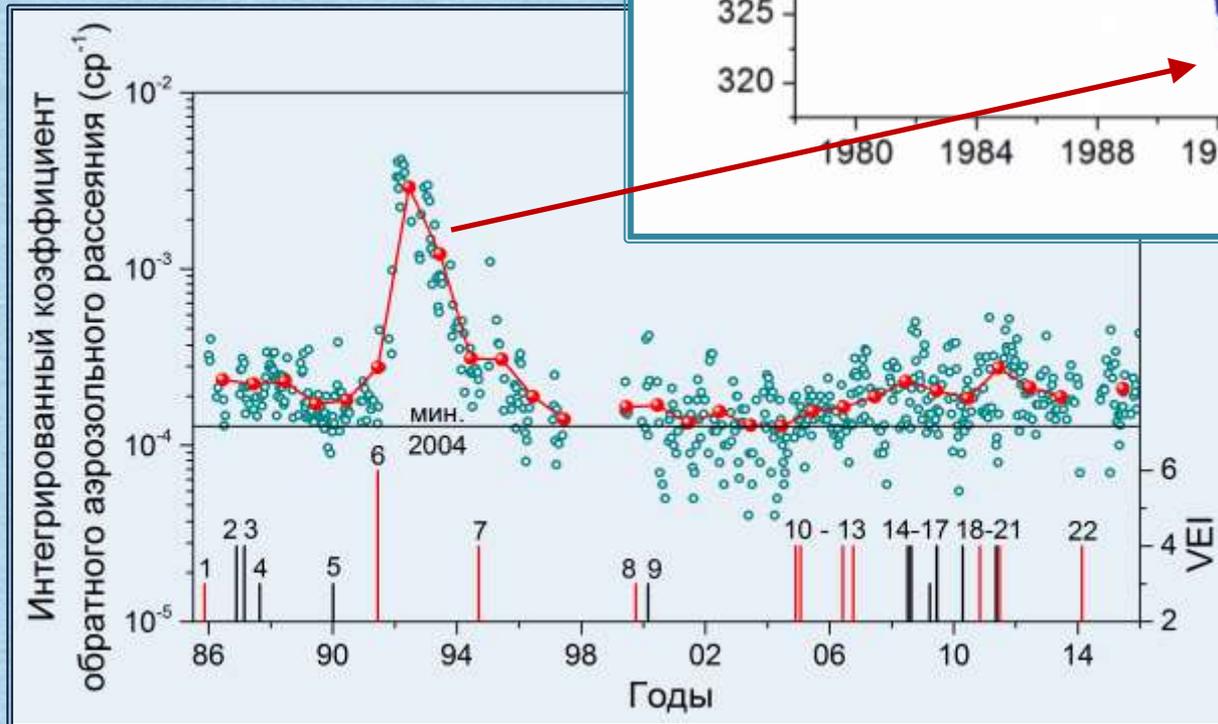
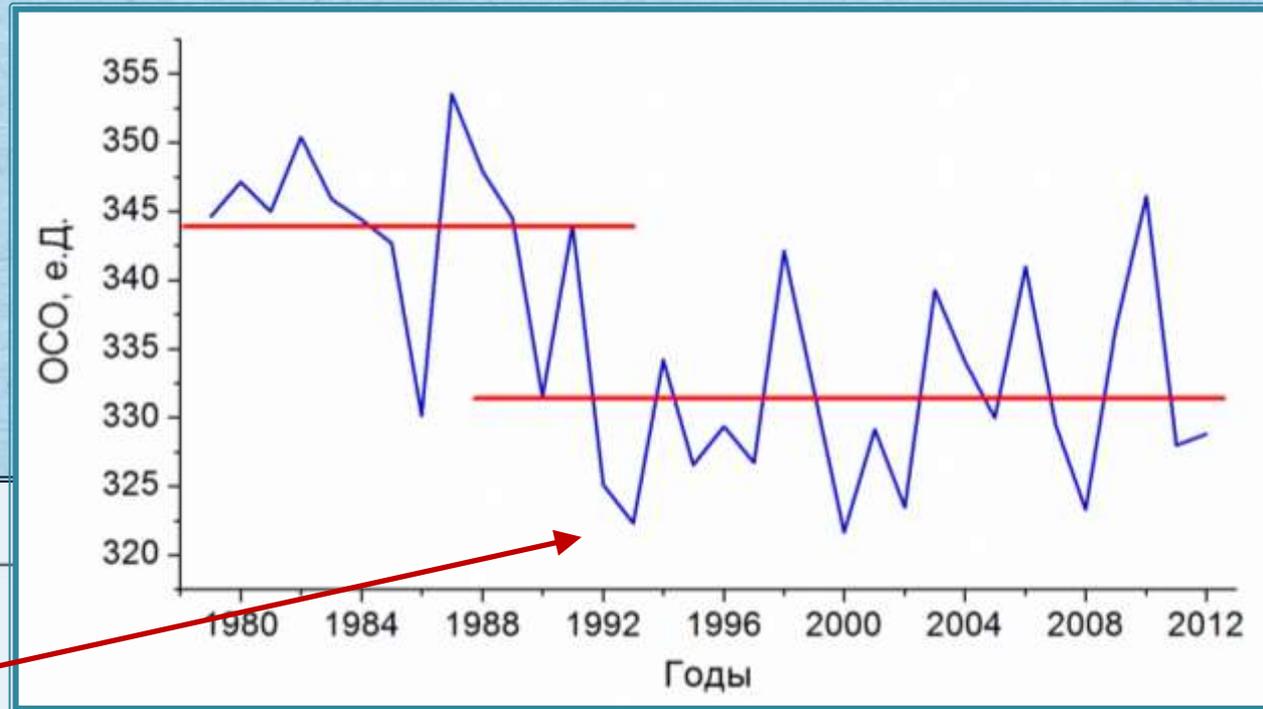


Выводы по разделу II

- ✓ Аэрозольное вулканогенное возмущение тропической стратосферы приводит к ее потеплению на 2-3°C относительно нормы и соответствующему усилению меридионального температурного градиента в стратосфере;
- ✓ Усиление меридионального температурного градиента в осенний период активизирует Арктический циркумполярный вихрь вплоть до весны, когда создаются все необходимые условия для формирования озоновой дыры;
- ✓ Все эпизоды формирования озоновых дыр над Арктикой, зарегистрированные с 1979 г. по н/в, связаны с предшествующими вулканогенными возмущениями тропической стратосферы.

**Вулканогенная депрессия
стратосферного озона в
средних и низких широтах**

Аэрозольное возмущение стратосферы над Томском и ОСО летом

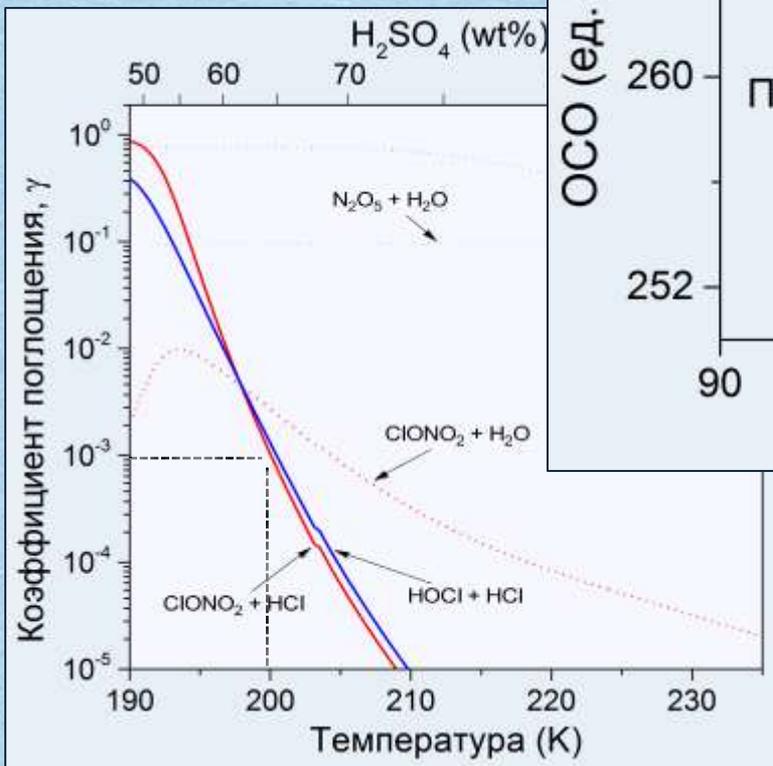
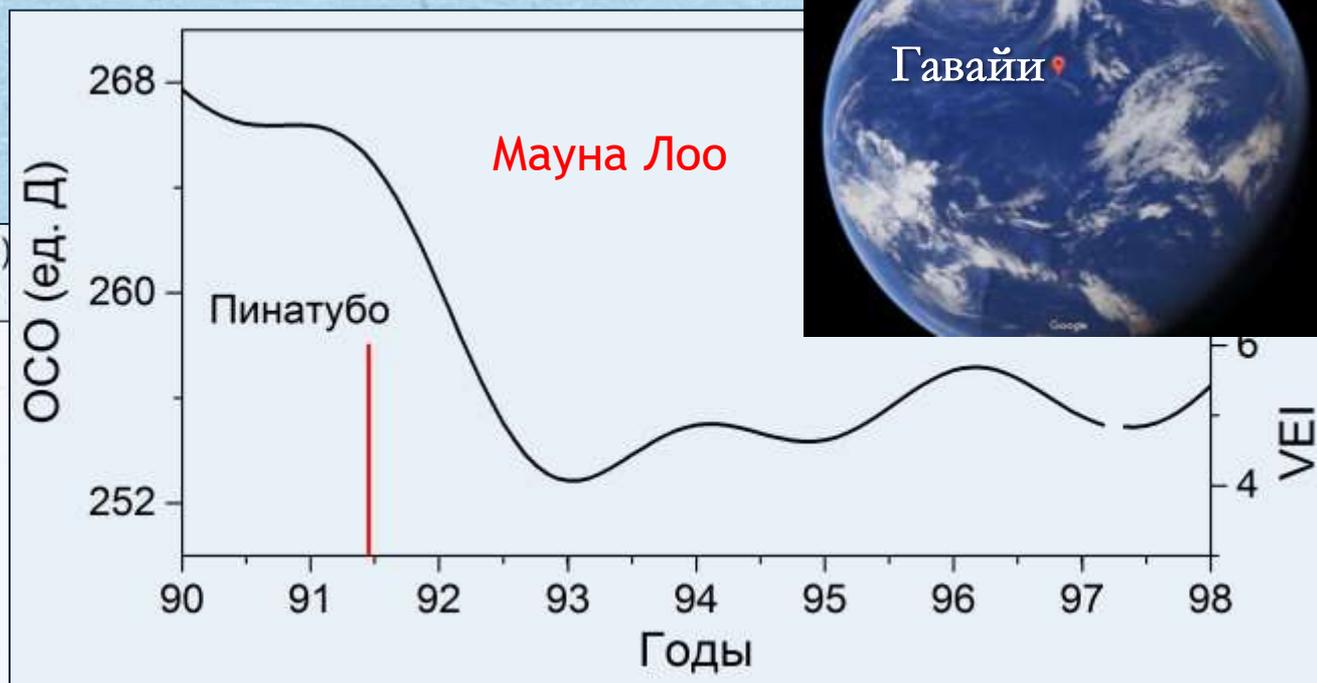


Вулканы, определившие аэрозольное возмущение стратосферы над Томском

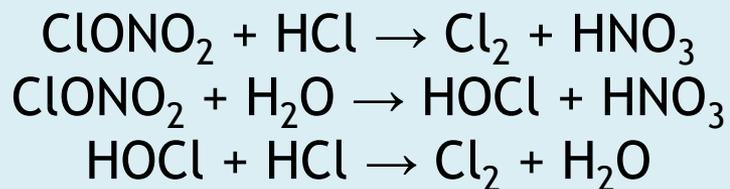
№	Дата извержения	Вулкан	VEI	H (км)
1	13.10.1985	Руиз	3	31
2	20.11.1986	Чикурачки	4	14
3	23.02.1987	Ключевской	4	14
4	28.08.1987	Кливленд	3	11
5	02.01.1990	Редубт	3	14
6	15.06.1991	Пинатубо	6	35
7	19.09.1994	Рабаул	4	21
8	05.10.1999	Гуагуа Пичинча	3	20
9	26.02.2000	Гекла	3	15
10	24.11.2004	Манам	4	18
11	27.01.2005	Манам	4	24

№	Дата извержения	Вулкан	VEI	H (км)
12	20.05.2006	Суфриер Хиллс	4	17
13	07.10.2006	Рабаул	4	18
14	12.07.2008	Окмок	4	15
15	07.08.2008	Касаточи	4	14
16	22.03.2009	Редубт	3	18
17	16.06.2009	Пик Сарычева	4	21
18	17.04.2010	Эйяфьятлай- ёкюль	4	11
19	04.11.2010	Мерапи	4	18
20	21.05.2011	Гримсвётн	4	20
21	13.06.2011	Набро	4	14
22	13.02.2014	Келут	4	20

Какой аэрозоль разрушает озон?

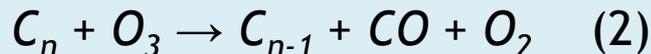
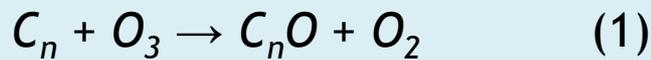


Реакции протекающие в H_2SO_4 :



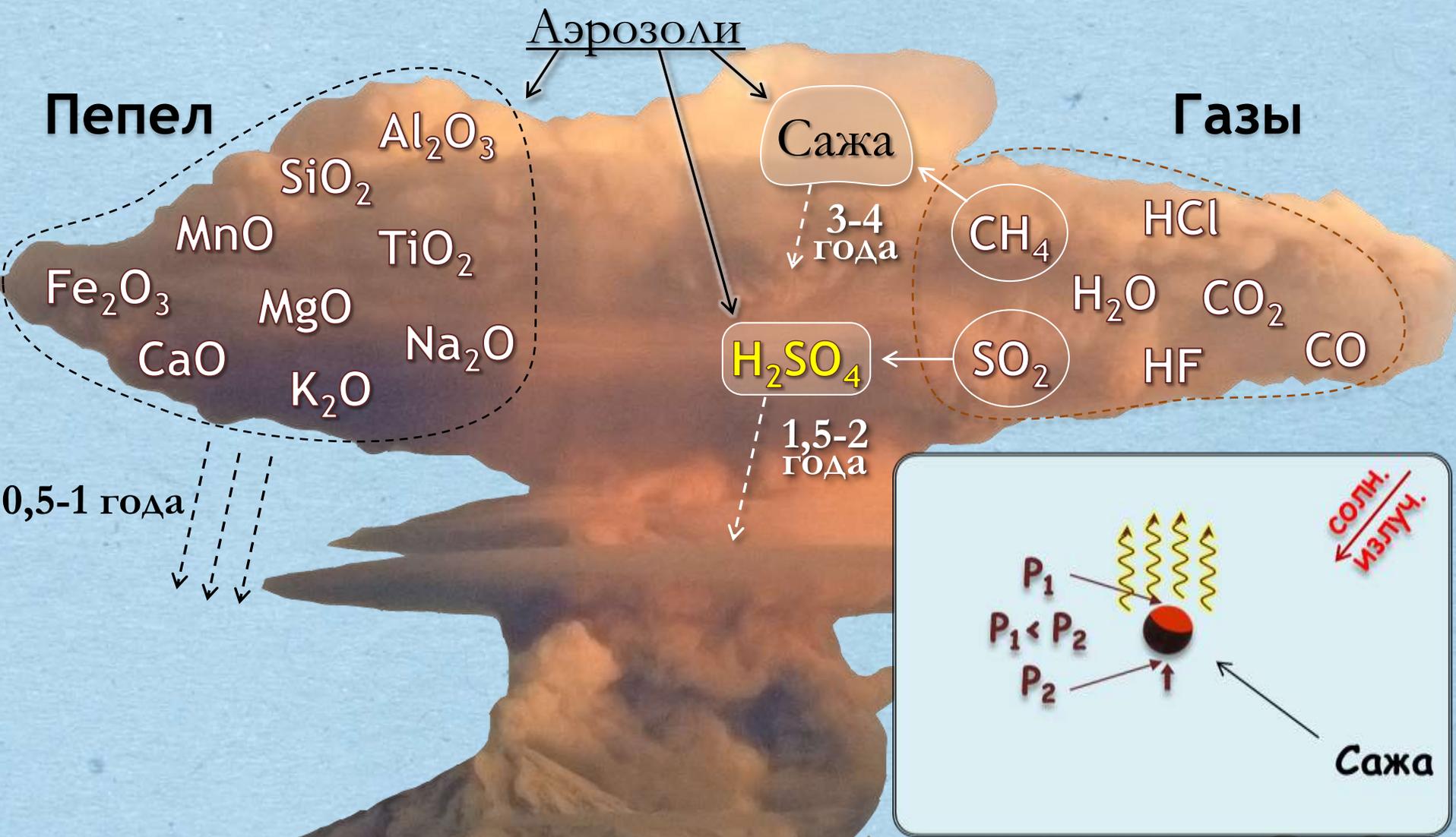
$\gamma \sim 10^{-5}$
при
 $T > 210K$

Реакции озона с
черным углеродом

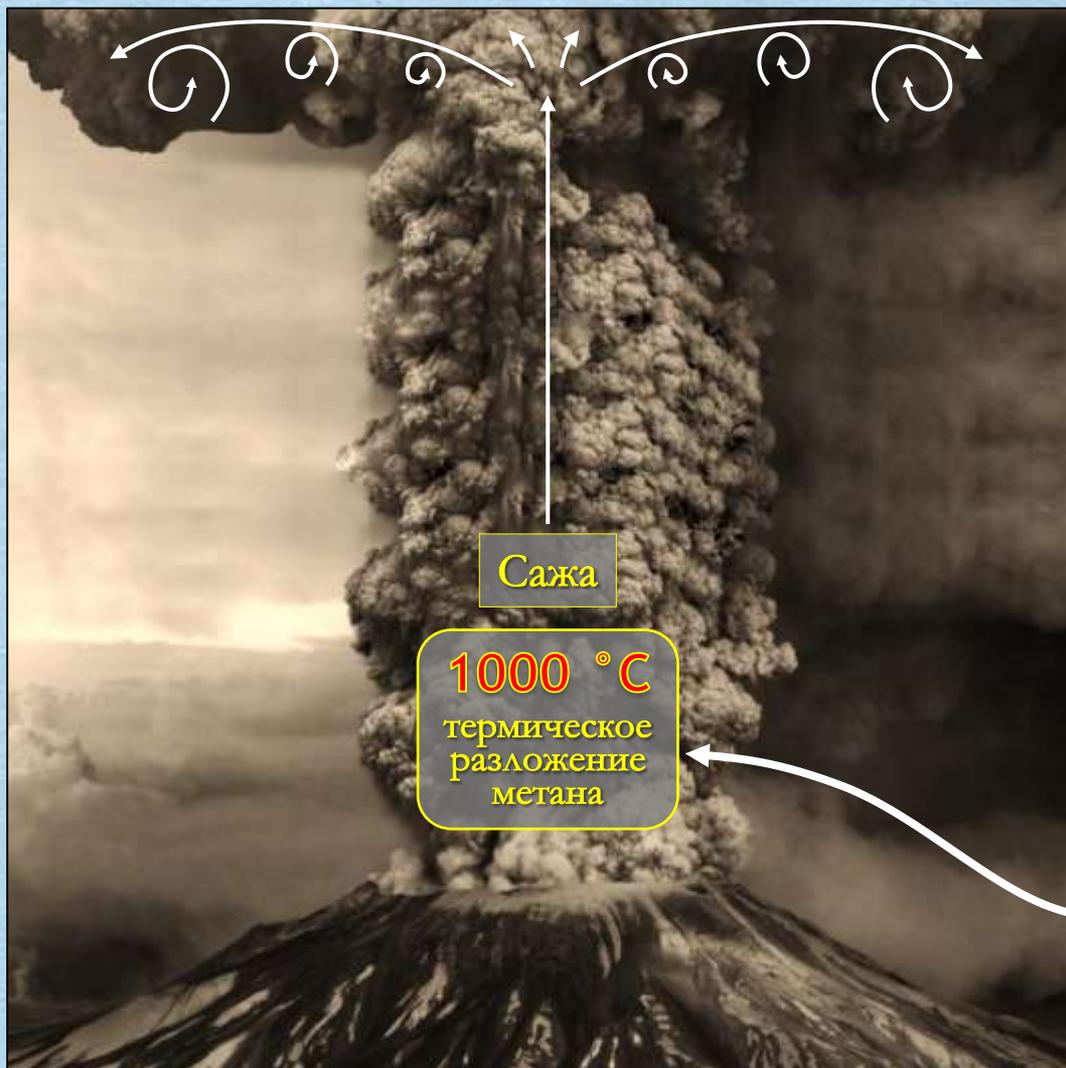


$\alpha > 2 \cdot 10^{-3}$

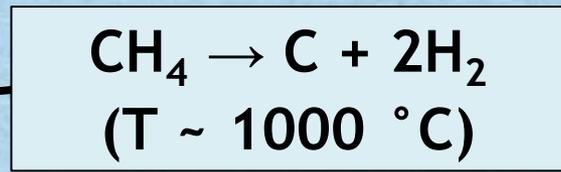
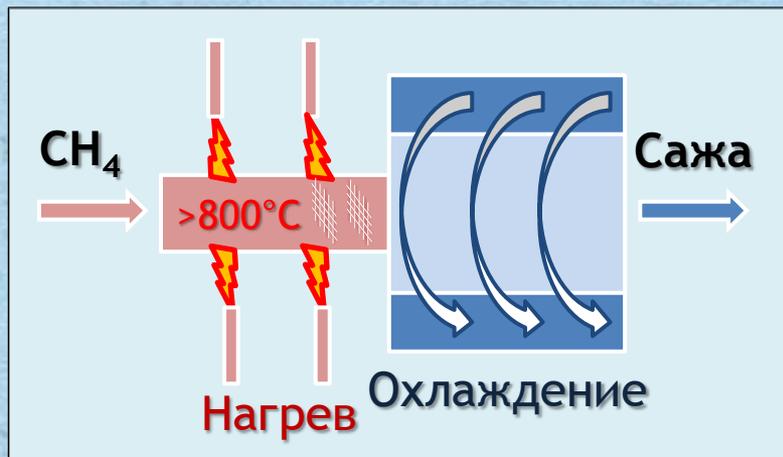
Основные компоненты вулканических выбросов



Механизм формирования сажи в эруптивной колонне



Технологический реактор производства технического углерода



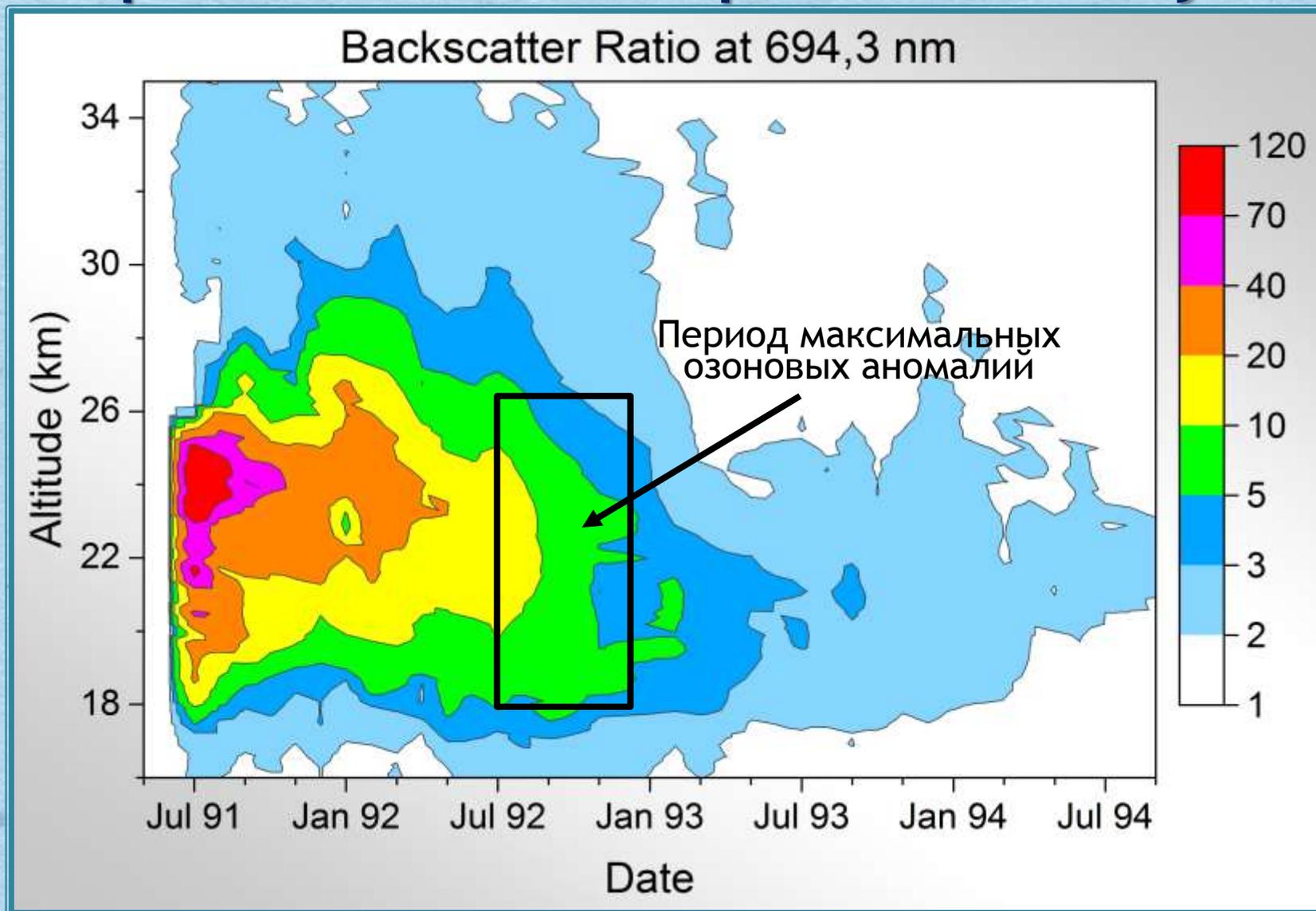
Условия для формирования фуллеренов в эруптивной колонне



Условия для
формирования
фуллеренов



Динамика релаксации сернокислотного аэрозоля после извержения Пинатубо

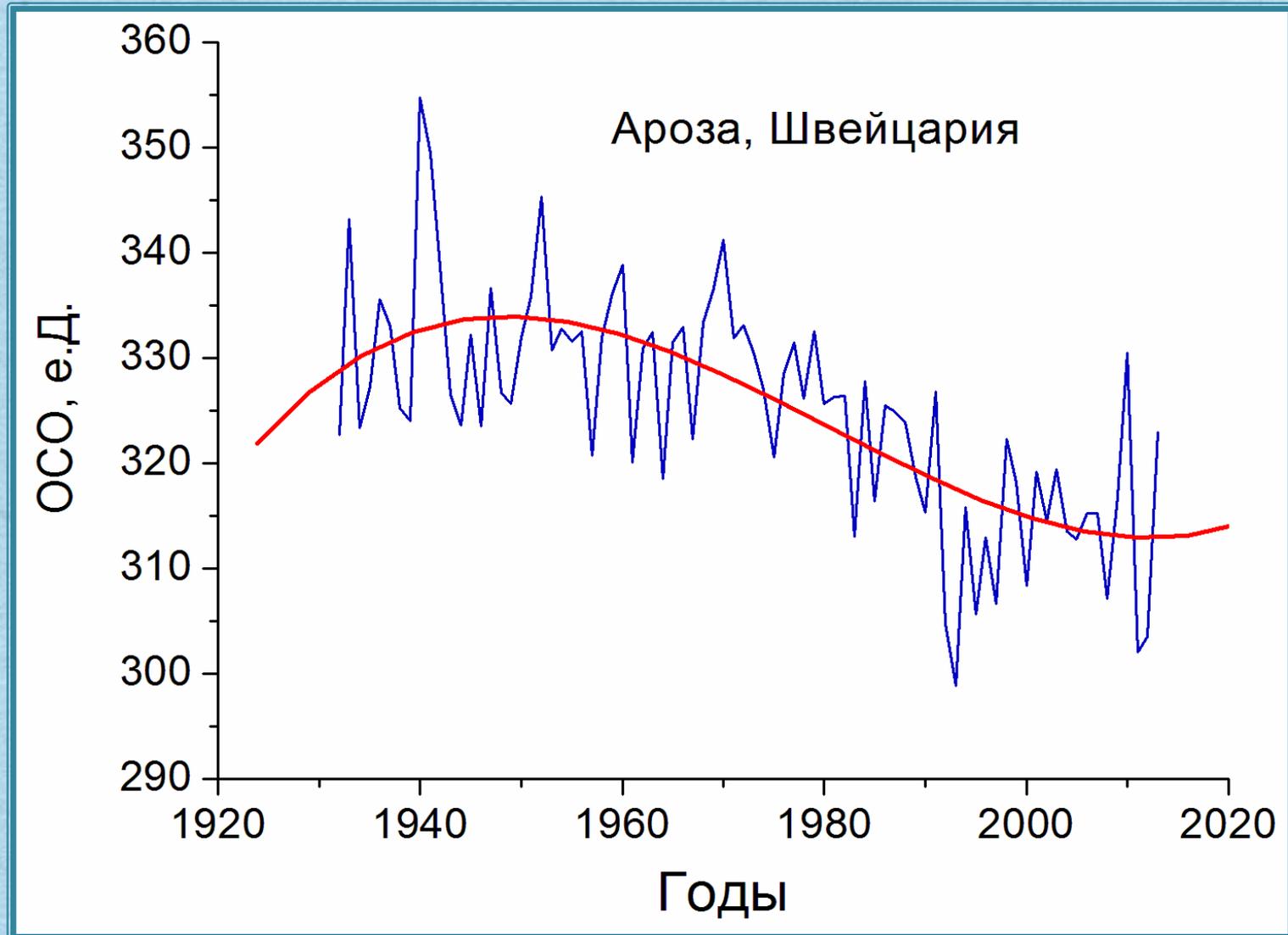


Выводы по разделу III

- ✓ Долговременная (более одного года) вулканогенная депрессия стратосферного озона в широтном поясе от 50° ю.ш. до 50°с.ш. объясняется только вулканическими выбросами в стратосферу нанодисперсной сажи;
- ✓ Вулканогенная сажа образуется в основании эруптивной колонны в результате термического разложения метана при температуре $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ в условиях высоковольтных электрических разрядов;
- ✓ Время жизни вулканогенной сажи в стратосфере достигает 3-4 лет благодаря низкой влажности и левитации под действием фотофорестических сил.

**Роль вулканизма в
долговременных изменениях
ОСО**

Долговременные изменения ОСО в умеренном поясе широт



Связь изменений ОСО и плотности годичных колец хвойных деревьев

Корреляция индексов ОСО, плотности годичных колец (ПГК), температуры (Т) и осадков (О) в Аросе

Длительность хронологии, гг.	Порода	Коэффициент корреляции (интервал перекрытия, гг.)		
		ПГК / ОСО (1926-1997)	ПГК / Т (1800-1997)	ПГК / О (1800-1997)
1788-1998	Кедровая сосна	<u>- 0,79</u>	< 0,1	- 0,1
1690-1998	Ель европейская	<u>- 0,71</u>	0,1	- 0,1
1792-1997	Лиственница	0,15	<u>0,3</u>	< 0,1

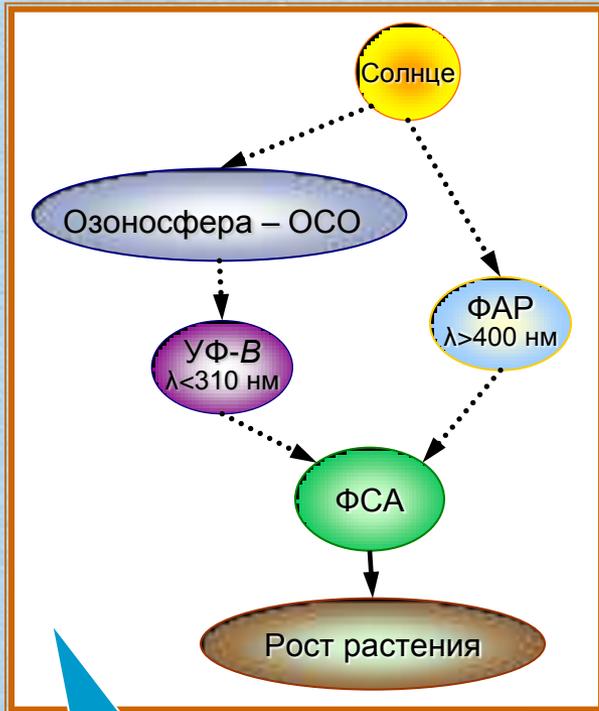
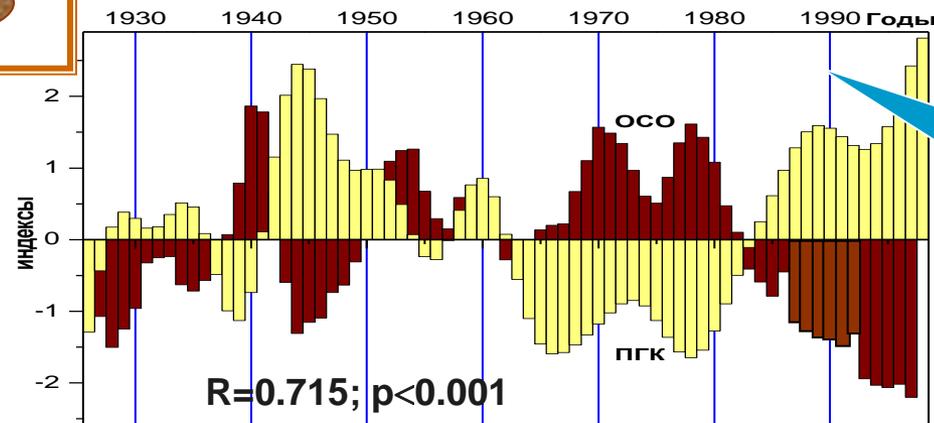
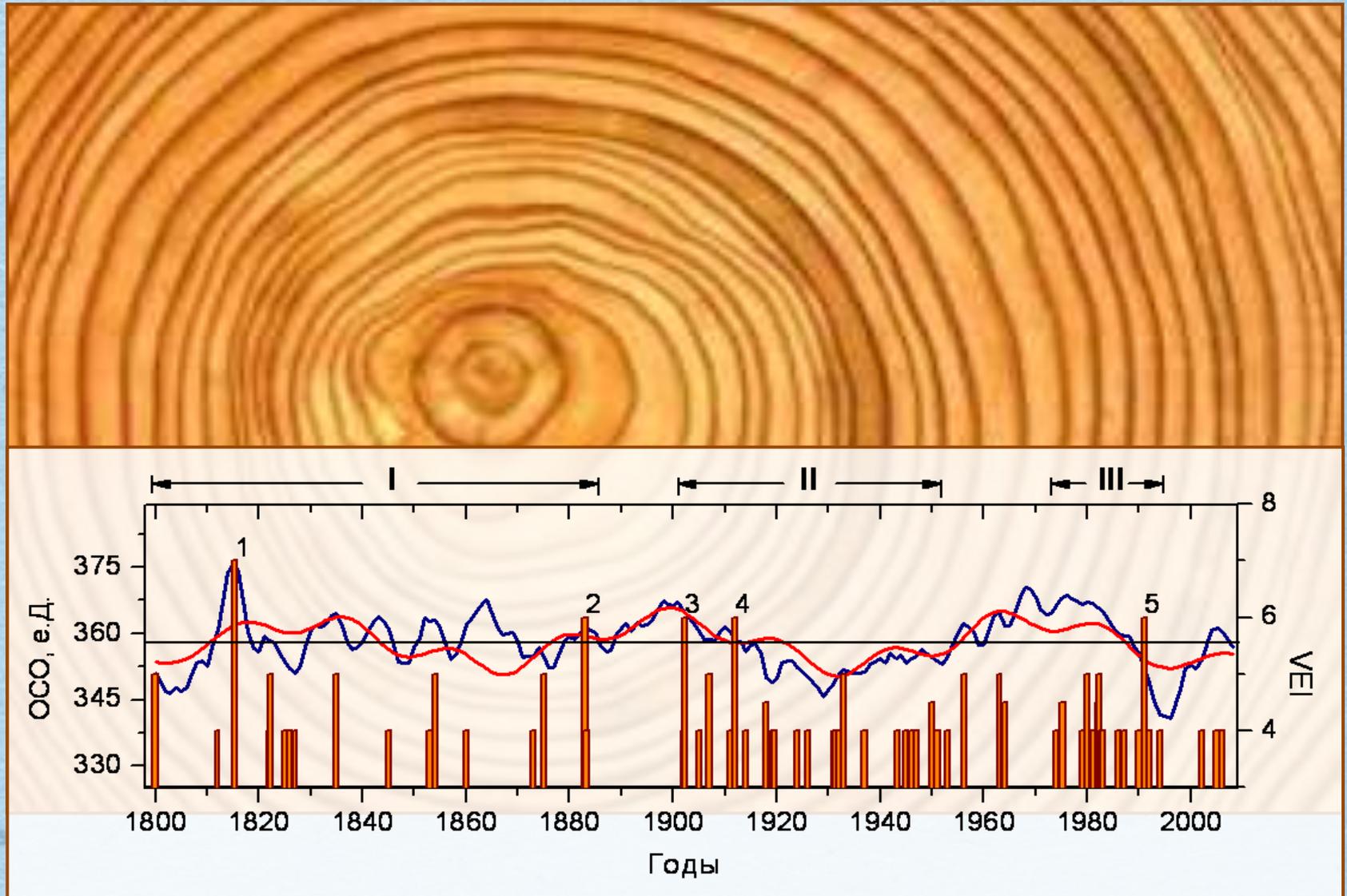


Схема влияния изменчивости ОСО на рост растения



Временной ход индексов ОСО и ПГК ели европейской

Реконструкция ОСО по ПГК хвойных



Столбики – хронология извержений с VEI ≥ 6: 1-Тамбора; 2-Кракатау; 3-Санта-Мария; 4-Катмай; 5-Пинатубо

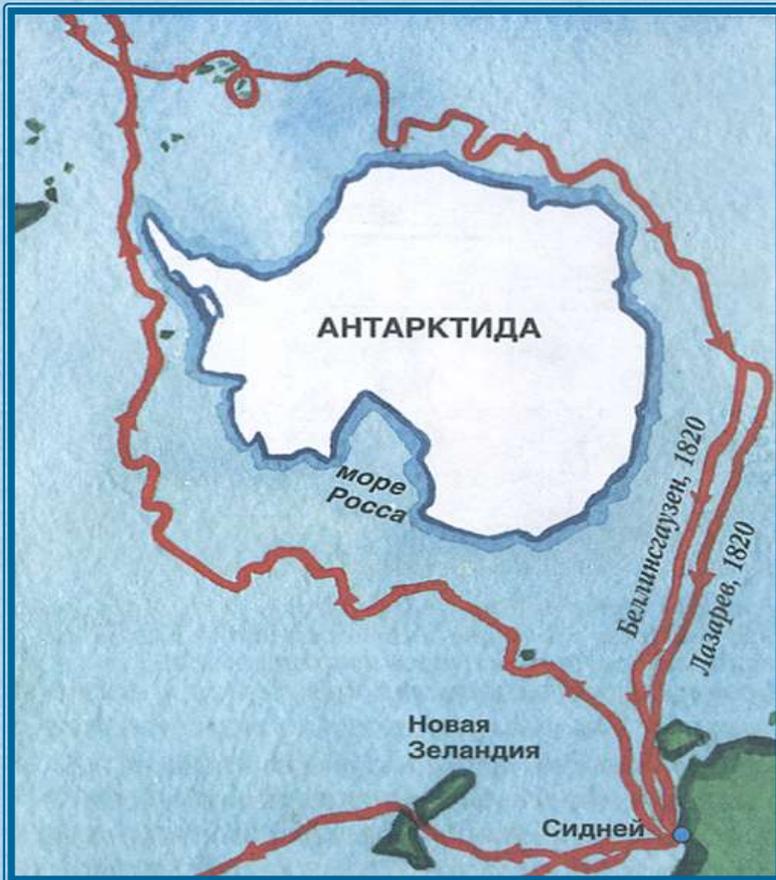
Выводы по разделу IV

- ✓ Долговременные изменения ОСО в средних широтах на протяжении последних 200 лет выражено модулируются 66-летним гравитационным циклом Солнечной системы и 22-летним циклом Солнечной;
- ✓ Отрицательные аномалии ОСО в основном связаны с вулканогенными возмущениями стратосферы. Их усиление происходит в отрицательной фазе циклических колебаний при высокой частоте следования вулканических извержений;
- ✓ Благодаря совпадению момента извержения вулкана Пинатубо и минимума циклических колебаний озоносферы при высокой частоте серийной активности вулканов в 90-х годах достигнут минимум ОСО за период последних 200 лет.

Заключение



В феврале 1775 года в своем путевом журнале известный первооткрыватель Джеймс Кук записал:
«...ни один человек никогда не решится проникнуть на юг дальше, чем это удалось мне. Земли, что могут находиться на юге, никогда не будут исследованы...»

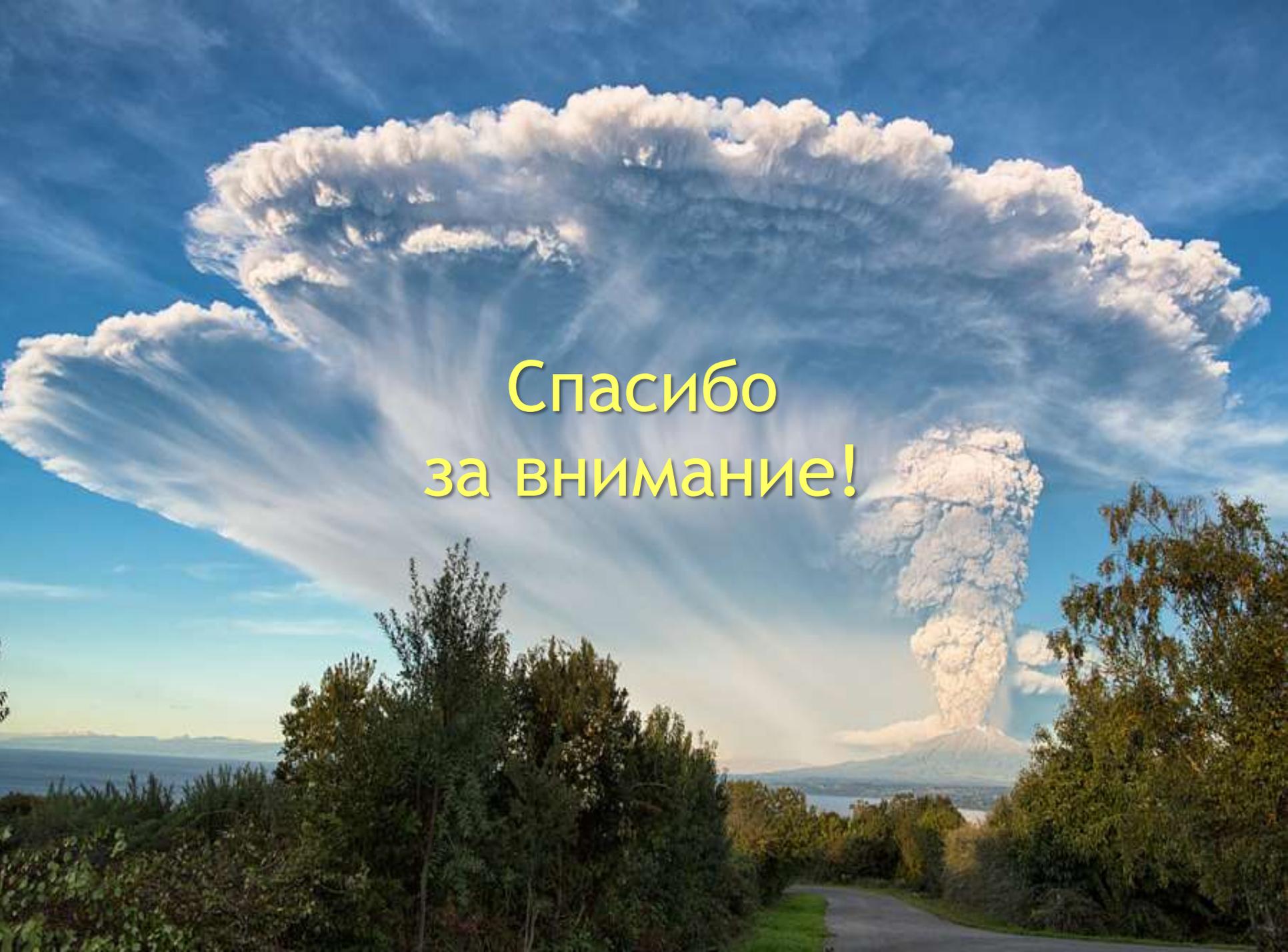


Открытие Антарктиды экспедицией Беллинсгаузена - Лазарева вызвали восхищение ученых всего мира. В 70-х годах XIX столетия известный немецкий географ Август Петерман писал о Беллинсгаузене:

«...Он бесстрашно пошел против мнения Кука, царившего во всей силе в продолжение пятидесяти лет... За эту заслугу имя Беллинсгаузена можно поставить... с именами тех людей, которые не отступали перед трудностями и воображаемыми невозможностями, созданными их предшественниками...»

Публикации

- ✓ Zuev V.V., Zueva N.E., Savelieva E.S., Gerasimov V.V. The Antarctic ozone depletion caused by Erebus volcano gas emissions // Atmos. Environ. 2015. V. 122. P. 393-399.
- ✓ Zuev V.V., Zueva N.E., Saveljeva E.S. Temperature and ozone anomalies as indicators of volcanic soot in the stratosphere // Atmos. Ocean. Opt. 2015. V. 28, N 1. P. 100-106.
- ✓ Zuev V.V., Zueva N.E., Koutsenogii P.K., Savelyeva E.S. Volcanogenic nanosized carbon aerosol in the stratosphere // Chem. Sustain. Dev. 2014. V. 22, N 1. P. 81-86.
- ✓ Zuev V.V. Reconstruction and prediction of long-period variations of the ozonosphere using ozonometric and dendrochronological data// Int. J. Remote Sens. 2005. V. 26, N 16. P. 3631-3639.
- ✓ Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V., Ivanov A.P., Chaikovskii A.P., Shcherbakov V.N. Processes of long-term relaxation of stratospheric aerosol layer in Northern Hemisphere midlatitudes after a powerful volcanic eruption // Atmos. Environ. 2001. V. 35, N 30. P. 5059-5066.
- ✓ Zuev V.V., Burlakov V.D., El'nikov A.V. Ten years (1986-1995) of lidar observations of temporal and vertical structure of stratospheric aerosols over Siberia // J. Aerosol Sci. 1998. V. 29, N 10. P. 1179-1187.

A photograph of a volcanic eruption. A massive, billowing plume of white ash and steam rises from a mountain in the distance, expanding into a large, mushroom-shaped cloud that fills much of the sky. The sky is a clear, vibrant blue. In the foreground, there are lush green trees and a paved road that curves through the landscape. The overall scene is dramatic and powerful.

Спасибо
за внимание!