

Выбросы газов из активных вулканов: парниковая составляющая

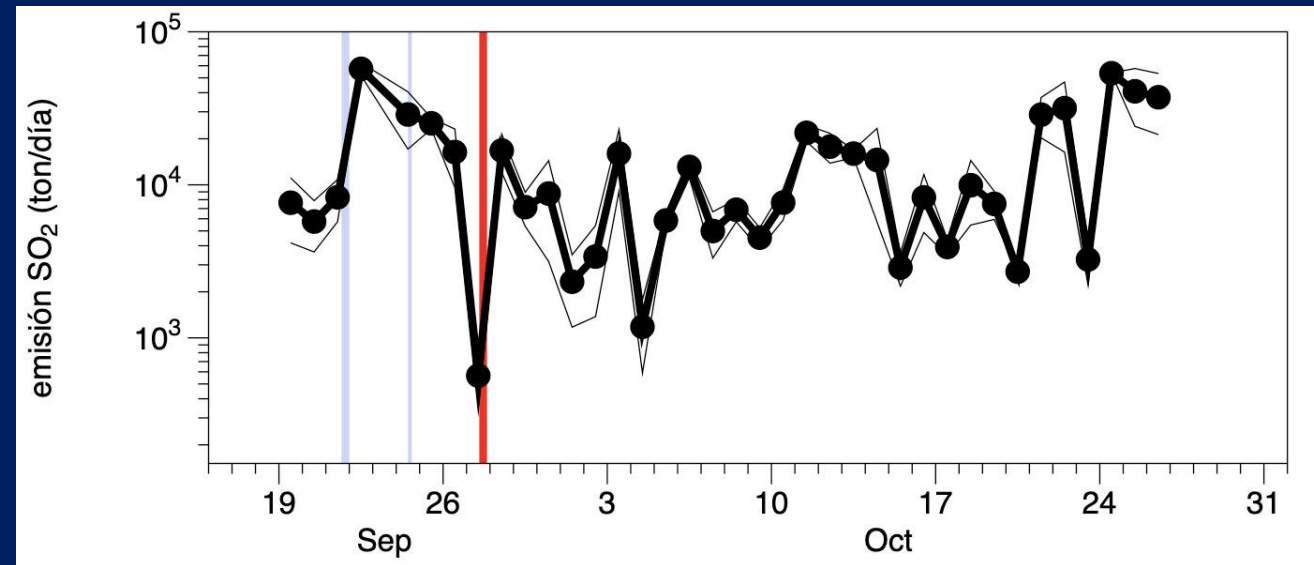
Кулаков Иван Юрьевич (ИНГГ СО РАН)

Смирнов Сергей Захарович (ИГМ СО РАН) ОУС ОНЗ



Извержение вулкана Ла Пальма,
Канарские острова,
(видео от 28 октября 2021 г. предоставлено
Вулканологической службой Канарских
островов)

Извержение вулкана Ла Пальма является источником большого количества газов



Luca D'Auria: This is SO2 in tons/day

Ivan Koulakov: Thanks! Is there any estimate for CO2? Same order of magnitude?

Luca D'Auria: The C/S ratio is variable, but CO2 on average should be ten times more. And H2O even more

Ivan Koulakov: ooooo! The total should enormous!

Luca D'Auria: Yes... much higher than Kilauea.

Ivan Koulakov: 10,000 SO2 + 100,000 CO2 + H2O = ~200,000-300,000 tons per day in total?

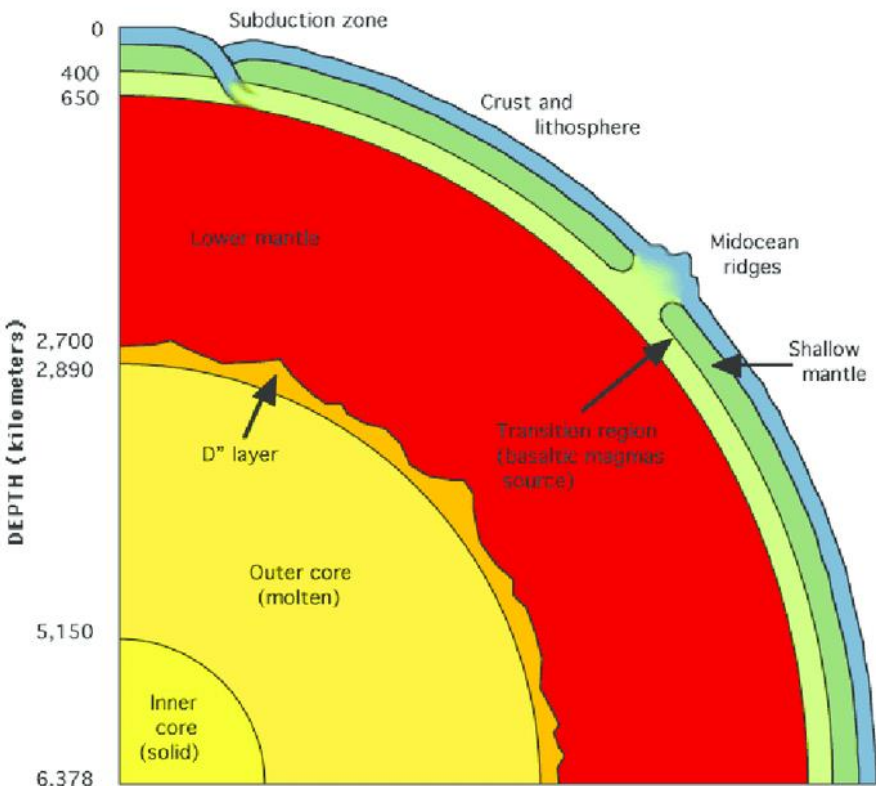
Luca D'Auria: Probably more. Some days we reached 1 million tons

Из переписки с Luca D'Auria, главным вулканологом InVolcan



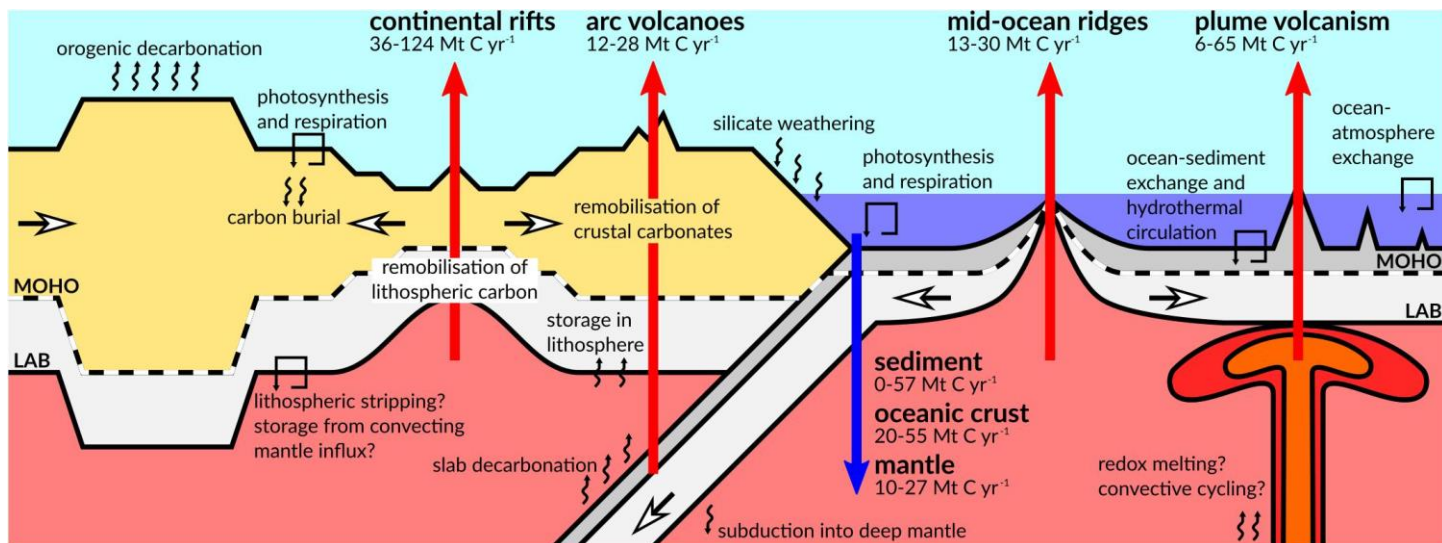
Фото: Роман Кулаков

Углерод в Земле



43,500 Гт: С над поверхностью Земли (океан, атмосфера, осадки)
37,000 Гт: С в океанах (85.1%)
3,000 Гт: С в морских осадках (6.9%)
2,000 Гт: С в биосфере (4.6%)
590 Гт: С в атмосфере (1.4%)

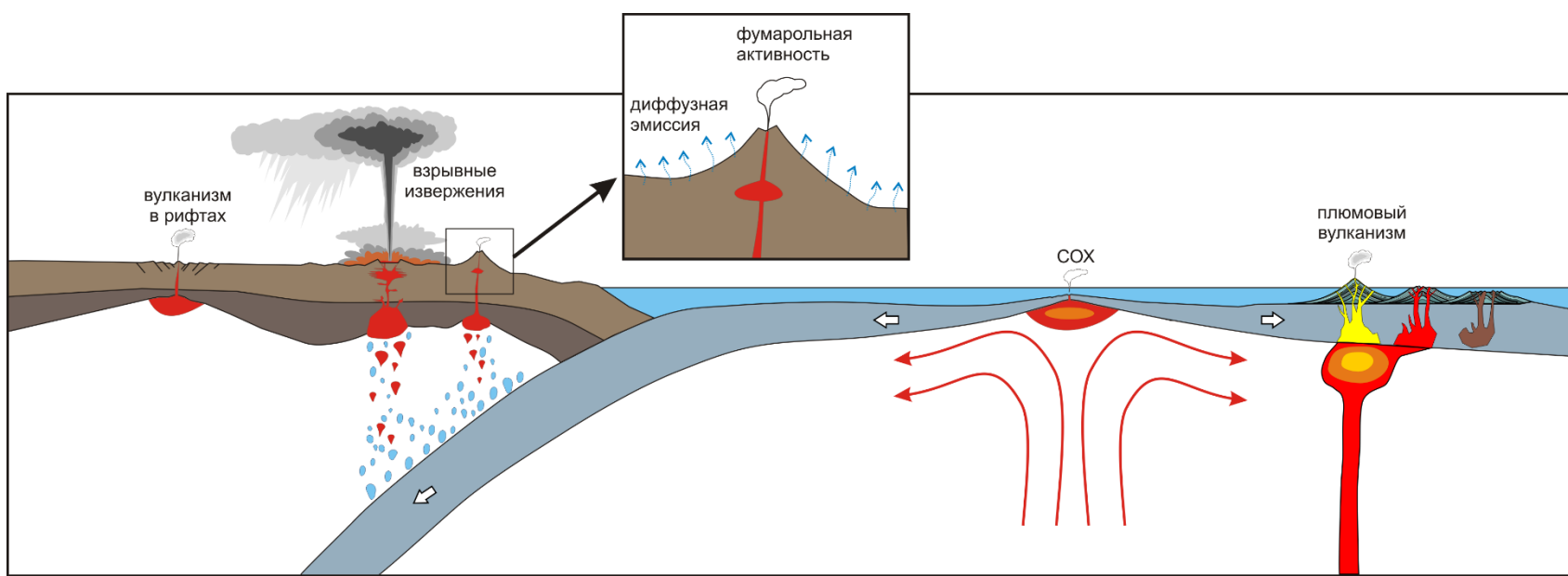
Вулканизм – основной способ выноса углерода и других летучих из глубинных недр Земли на поверхность.



Согласно выводам работы Deep Carbon Observatory, захоронение С в зонах субдукции, в целом, находится в балансе с выносом С вулканами.

Исключения - трапповые извержения объемом миллионы км³ (до 30 000 Гт CO₂) 4 раза за последние 500 млн лет.

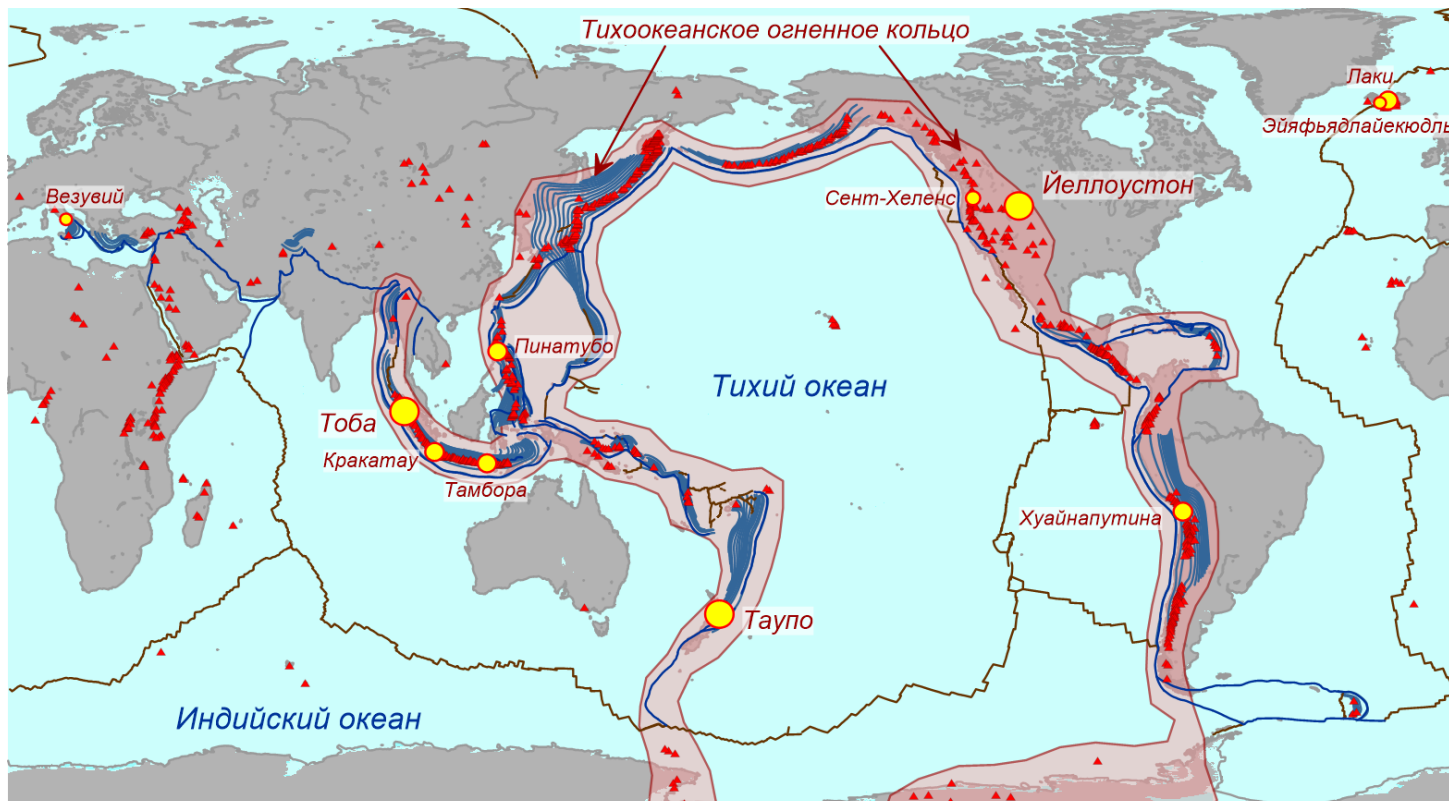
Wong, K., Mason, E., Brune, S., East, M., Edmonds, M., & Zhirovic, S. (2019). Deep carbon cycling over the past 200 million years: a review of fluxes in different tectonic settings. *Frontiers in Earth Science*, 7, 263.



Вклад вулканов в эмиссию парниковых газов:

Вулканы способны выбрасывать огромное количество твердого материала и газов в атмосферу.

Более 500 вулканов являются источником постоянной эмиссии газов.



В среднем раз в 100 лет происходит извержение, существенно влияющее на климат Земли (региональный и даже глобальный).

Рассмотрен вклад отдельных факторов:

1. текущая фумарольная дегазация;
2. диффузная эмиссия вулканов;
3. взрывные извержения;
4. отдельно – катастрофические извержения;
5. срединно-океанические хребты

Неэруптивная дегазация вулканов

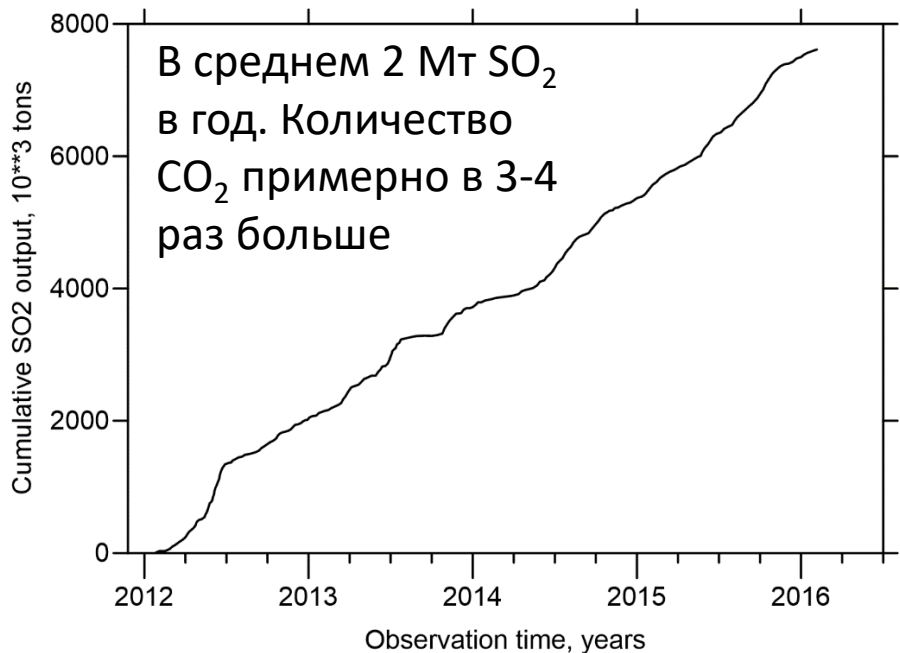
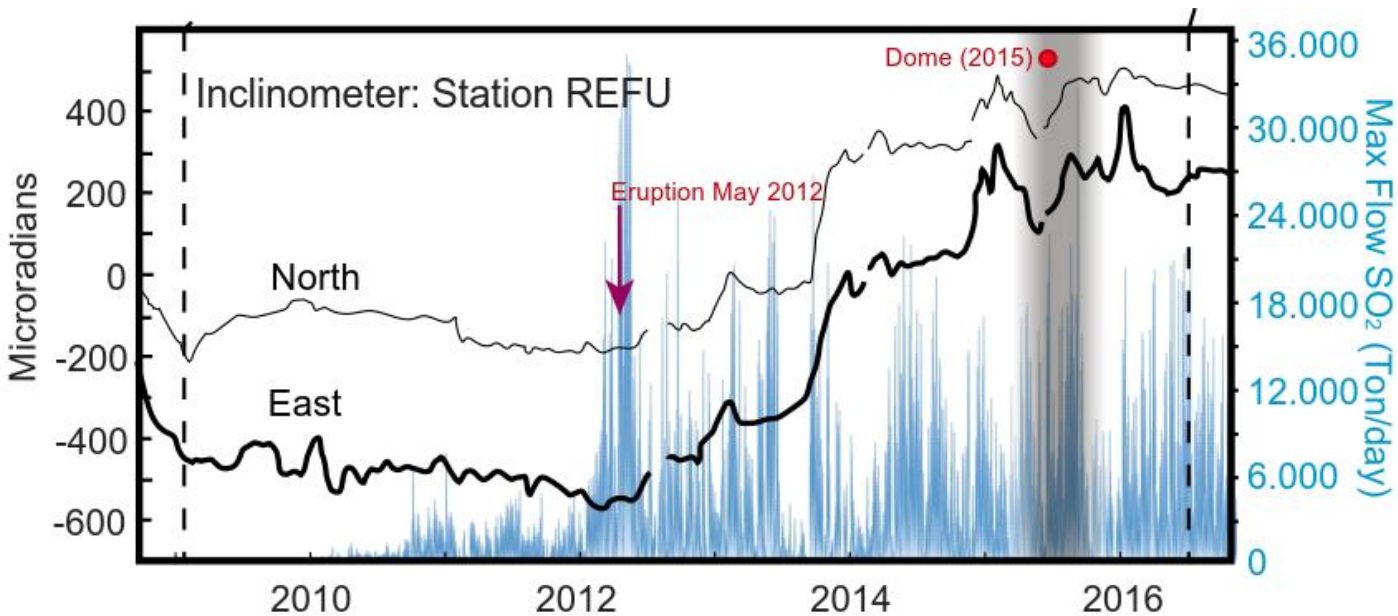
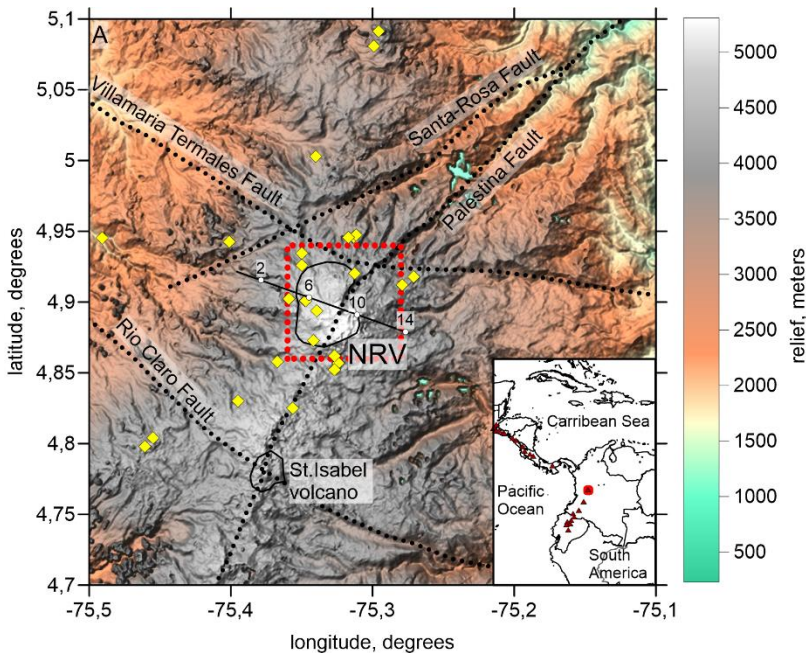
Fischer et al., 2019, SciRep



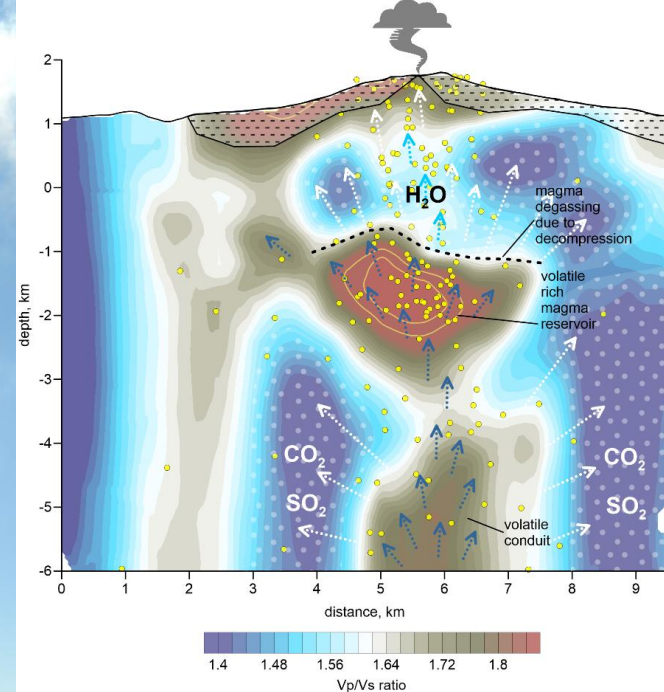
Вулкан Невадо дель Руис (Колумбия):



С 2011 по 2017 годы наблюдался стабильно высокий уровень сейсмичности и дегазации. Общий средний выброс газов – 250-300 Кт в сутки, из них ~80 % - водяной пар, а остальное – CO₂, SO₂ и другие газы, многие из которых являются парниковыми.



Gorely, Kamchatka:
CO₂ – 321 kt/y
SO₂ – 274 kt/y
Fischer et al., 2019



Kuznetsov et al., 2017

Вулкан Горелый

С 2009 по 2014 годы
активная дегазация:
Всего 11 000 тонн газов в
сутки, из них:
9700 т. H₂O
800 т. SO₂
660 т. CO₂
240 т. HCl
35 т. HF
2 т. H₂

Aiuppa, A., et al. (2012), First
volatile inventory for
Gorely volcano, Kamchatka,
Geophys. Res. Lett., 39,
L06307



Photo: Ivan Koulakov

Сейчас дегазация
практически прекратилась



Дегазация Авачинского вулкана

(по Малик и др., 2017)

Температура газов доходит до 800°C

5.5 кТонн в день, из которых

92% - вода,

5.6% - CO_2 ,

5.1% - SO_2 ,

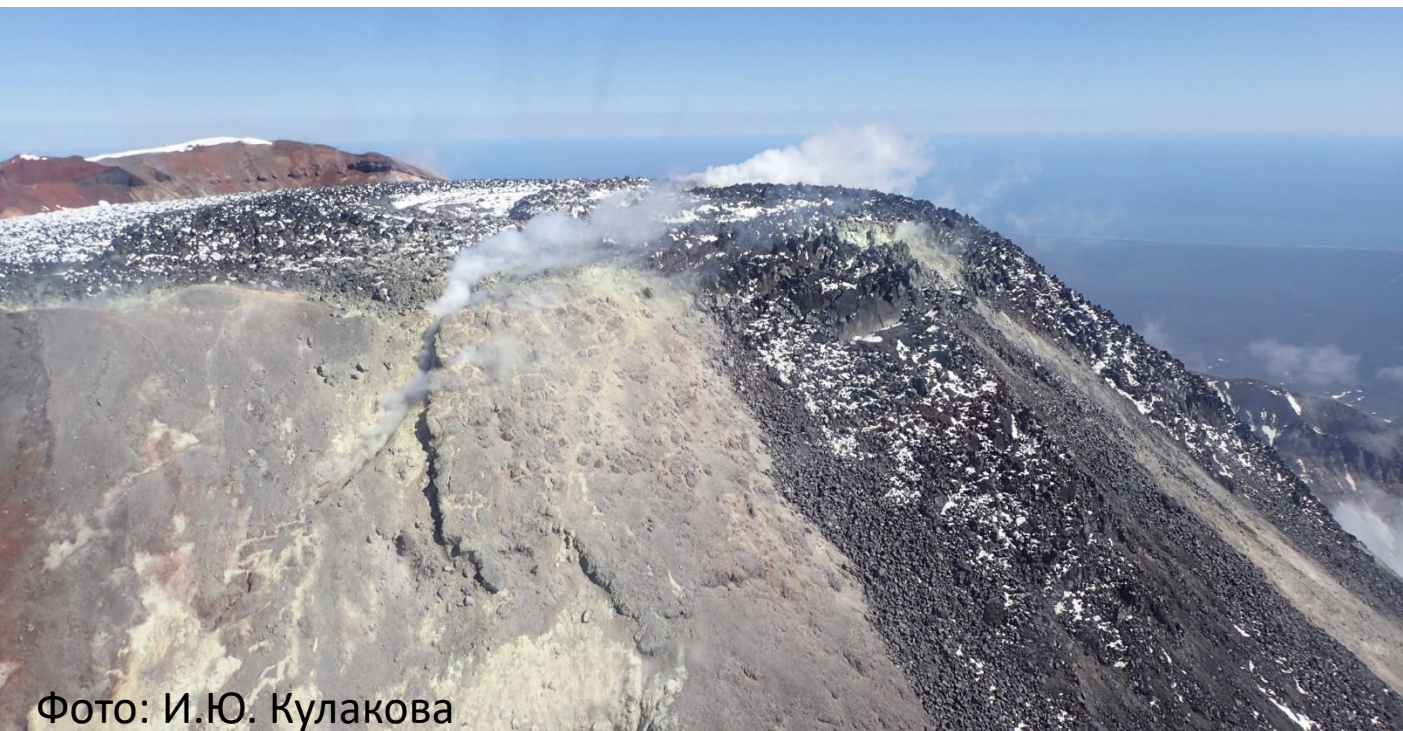
0.58% - H_2S .

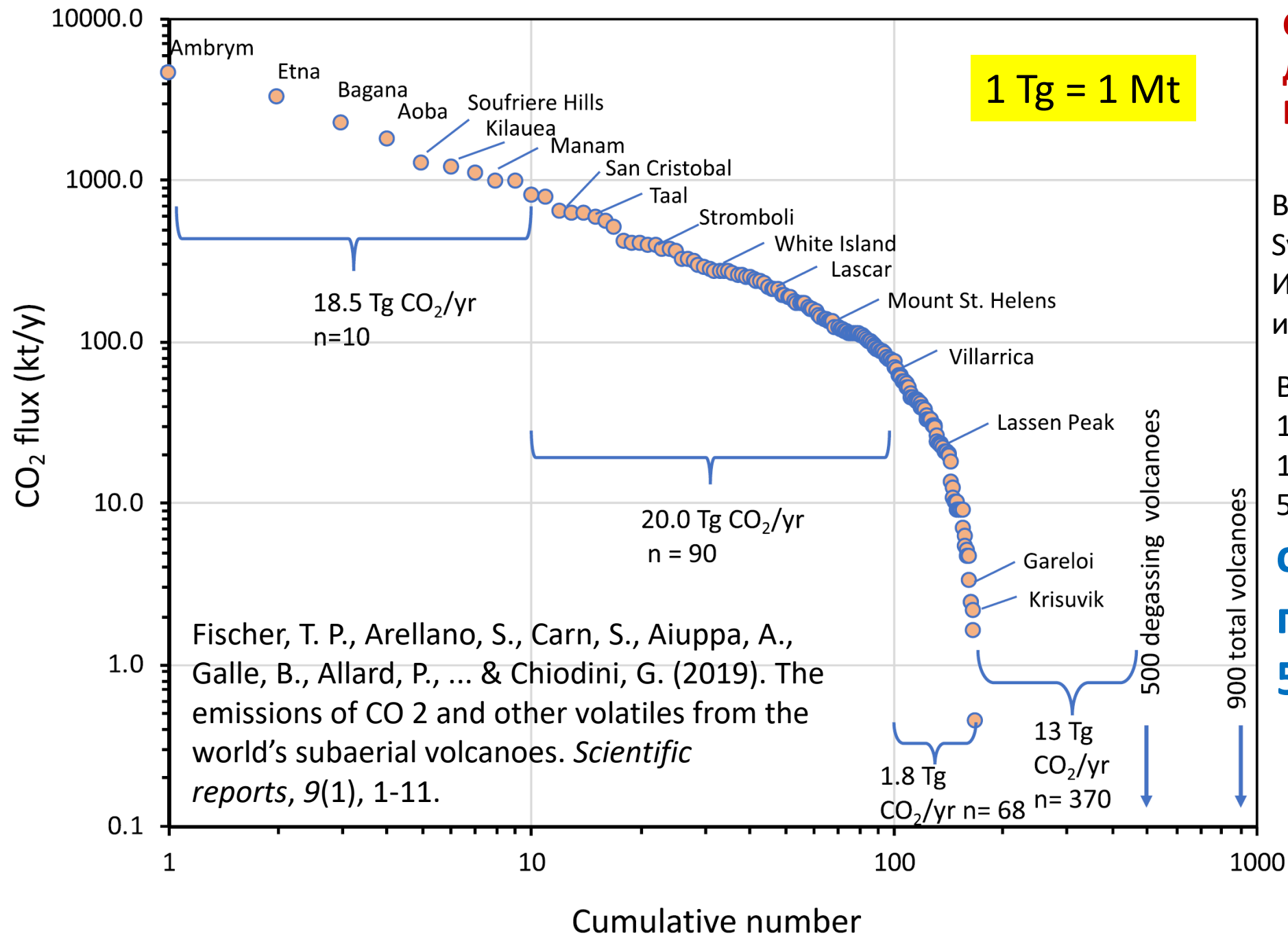
Avachinsky, Kamchatka:

CO_2 – 212 kt/y

SO_2 – 258 kt/y

Fischer et al., 2019





Суммарная незруптивная дегазация вулканов (по Fischer et al. 2019):

Всего 898 вулканов из списка Syracuse and Abers (2006). Из них только 500 имеет измеренную дегазацию.

Выбросы CO₂:

10 первых вулканов – 18.5 Мт,

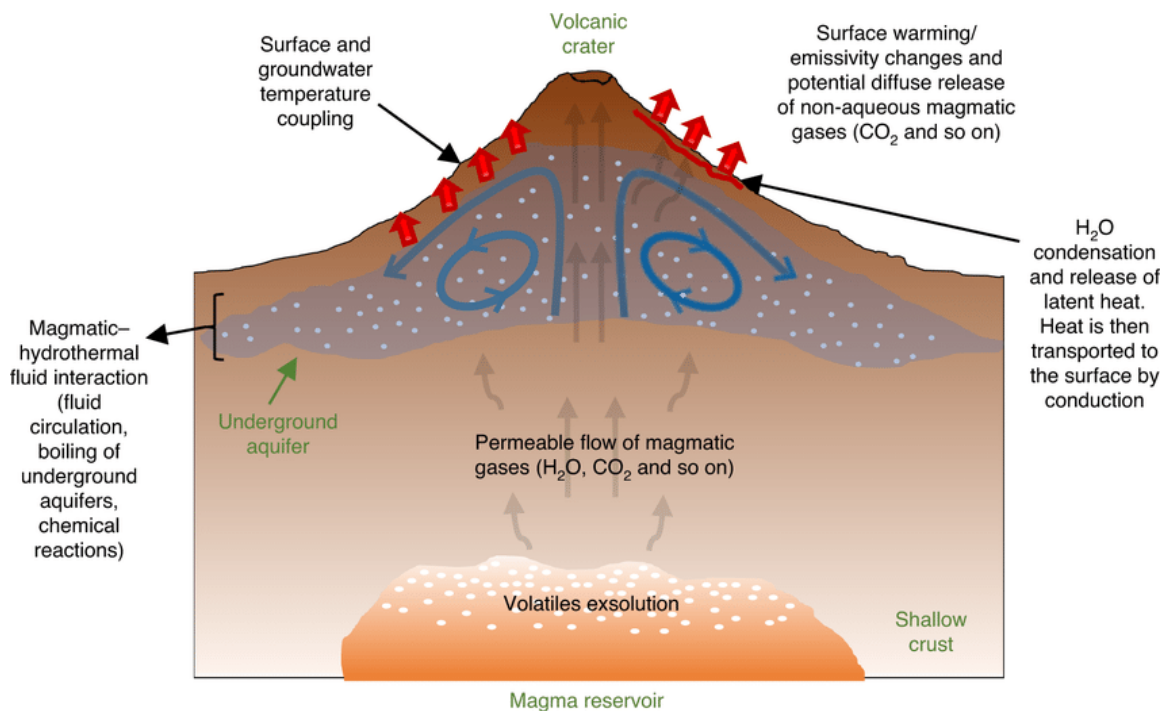
100 вулканов – 38.5 Мт

500 вулканов с дегазацией =

**суммарная оценка
по Земле –
51.3 Мт**

**Это без учета взрывных
извержений, которые
тоже вносят свой вклад**

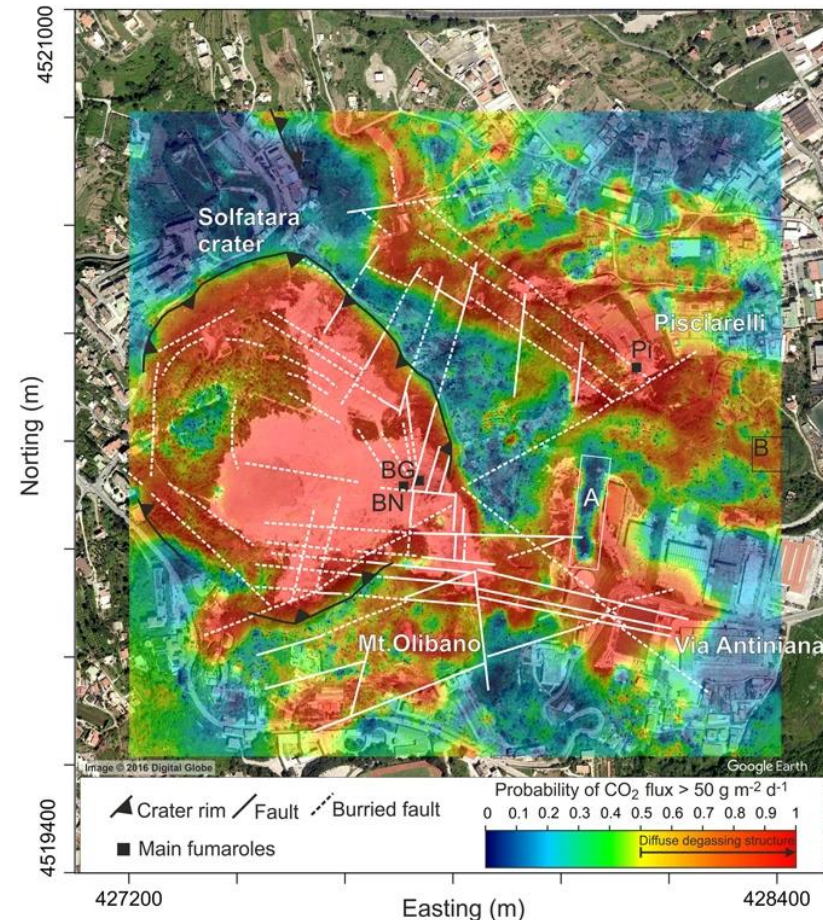
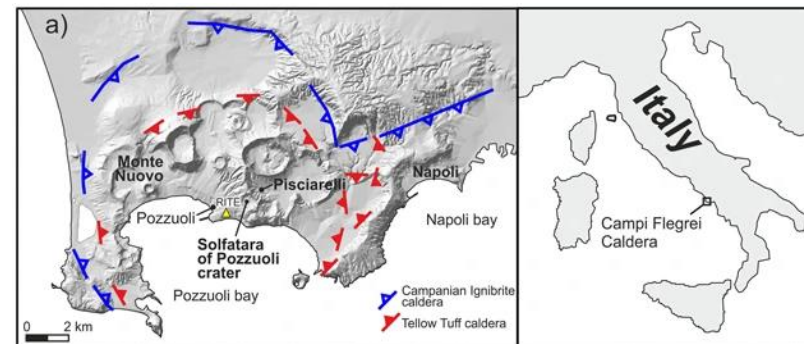
Диффузная газовая эмиссия на вулканах



Значительная часть летучих выходит не из основного жерла, а в форме диффузной эмиссии на обширных территориях. Проводимых измерений пока недостаточно для полной оценки для всей Земли.

В работе Fischer et al. (2019) сделана экстраполяция данных, имеющихся по 73 районам на все вулканические области мира и получена оценка:

93 Мт CO₂/год (от 47 Мт/г до 174 Мт/г)



Пример измерения диффузной эмиссии CO₂ в вулканическом районе Флегрейских полей (Campi Flegrei) в Италии (Cardellini et al., 2017, SciRep)

Anatahan, Mariana (2003):
CO₂ – 1917 kt
SO₂ – 2324 kt



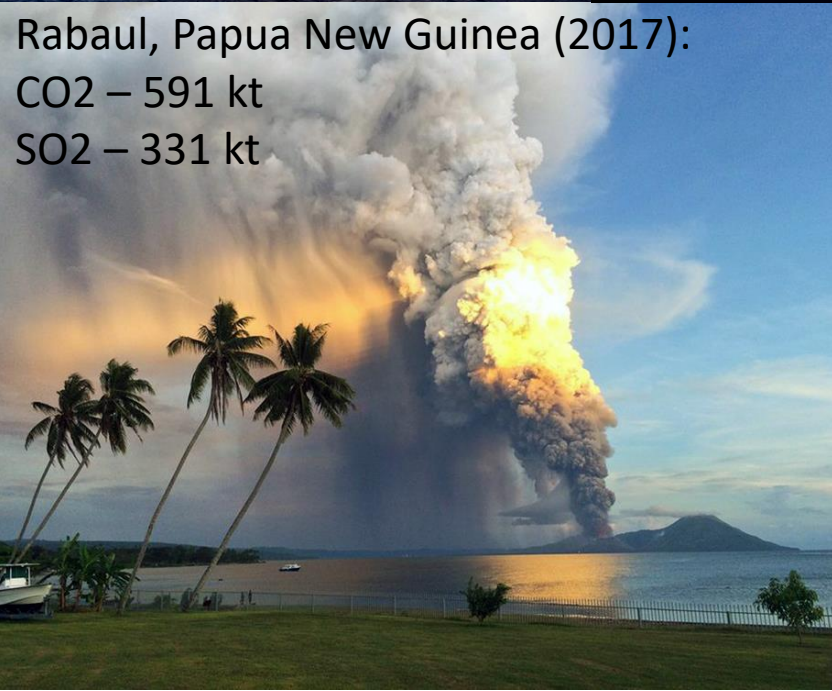
Soputan, Sulawesi (2018):
CO₂ – 402 kt
SO₂ – 117 kt



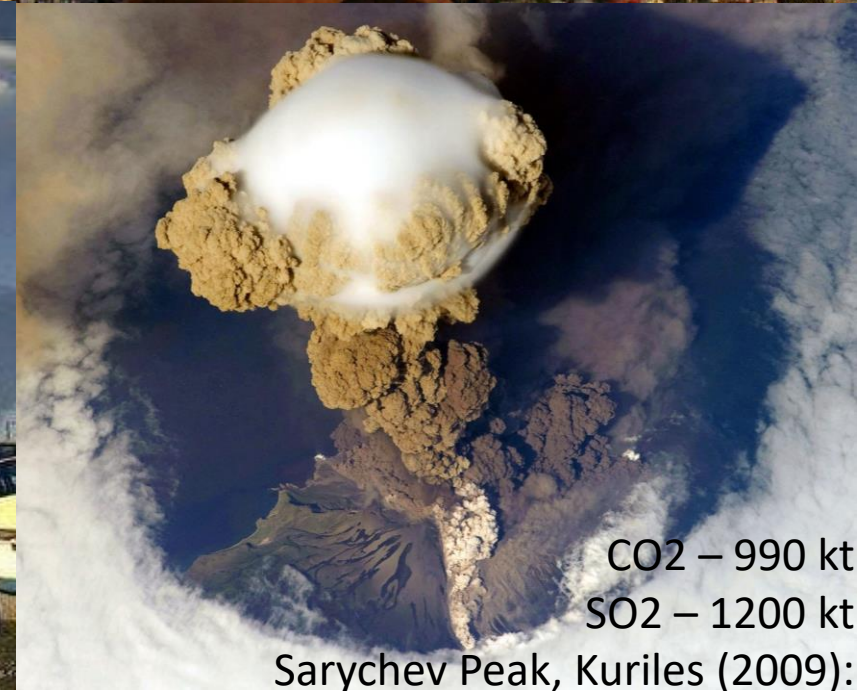
Calbuco, Chile (2015):
CO₂ – 330 kt
SO₂ – 400 kt



Rabaul, Papua New Guinea (2017):
CO₂ – 591 kt
SO₂ – 331 kt



Sangeang, Bali (2014):
CO₂ – 336 kt
SO₂ – 100 kt



CO₂ – 990 kt
SO₂ – 1200 kt

Sarychev Peak, Kuriles (2009):

В работе Fischer et al., (2019) были рассмотрены все значимые извержения на Земле за период с 2005 по 2017 год.

Всего 89 вулканов за 13 лет по их оценкам извергли 33.3 Мт SO₂ или 2.6 Мт SO₂ в год.

23.5 Мт CO₂ или 1.8 Мт CO₂ в год

Аналогичные оценки (1.9 Мт CO₂ в год) дает Werner et al., (2019)

Fischer, T. P., Arellano, S., Carn, S., Aiuppa, A., Galle, B., Allard, P., ... & Chiodini, G. (2019). The emissions of CO₂ and other volatiles from the world's subaerial volcanoes. *Scientific reports*, 9(1), 1-11.

Werner, C. et al. Carbon Dioxide Emissions from Subaerial Volcanic Regions. In *Deep Carbon: Past to Present*. Edited by Beth N. Orcutt, Isabelle Daniel, Rajdeep Dasgupta. Cambridge University Press, <https://doi.org/10.1017/9781108677950> (2019).

Вулкан Тамбора (Индонезия) 1815 год - крупнейшее извержение в человеческой истории

10 апреля 1815 г. – взрыв, который был слышен
на Суматре на расстоянии 2600 км

Кромешная тьма на расстоянии 600 км от
вулкана.

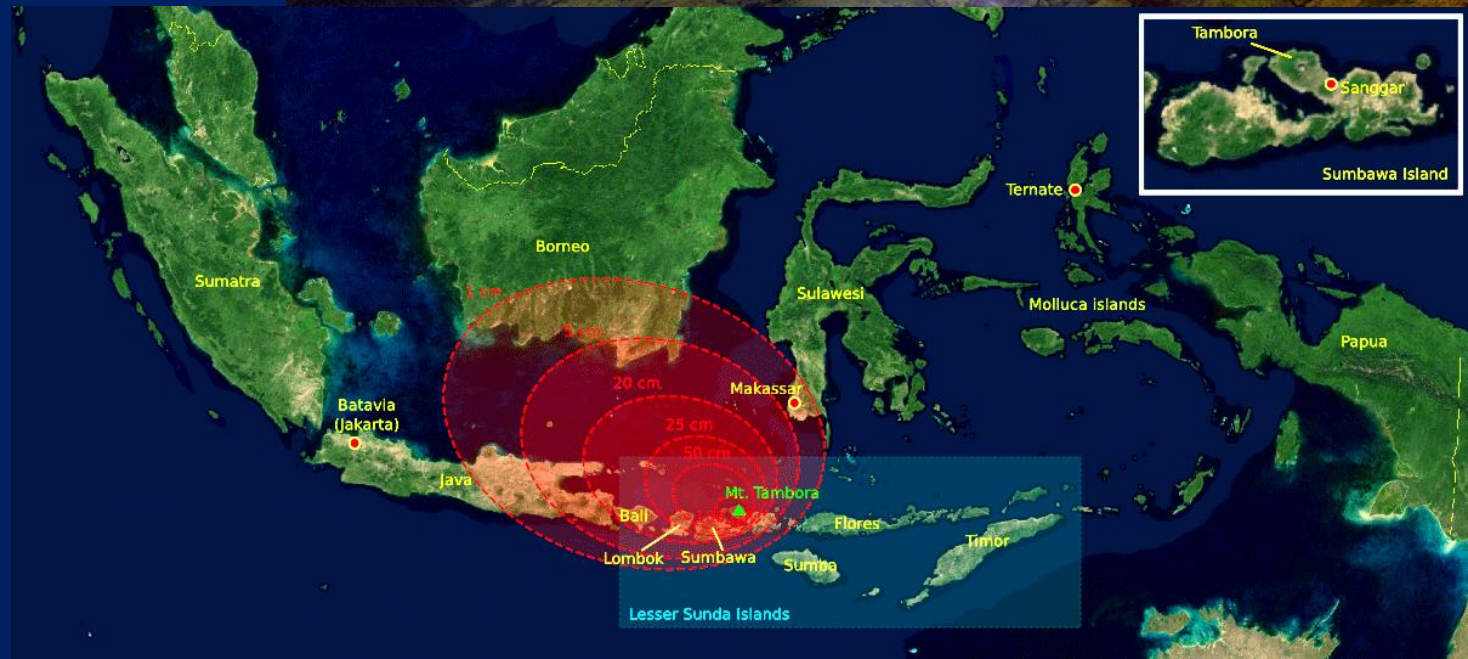
В твердом эквиваленте в атмосферу выброшено
50 км³ материала

Глобальное влияние на климат:

1816 год без лета в Европе и Северной
Америке. Снег летом

Голод и эпидемия тифа в Европе
привели к беспорядкам

Массовый голод и холера в Индии



Нуаунапутина volcano (Перу):

16 февраля – 9 марта 1601 г. Причина «малого ледникового периода» в Европе:

В 1601-1603 годы – страшнейший голод в России, ставший одной из причин смутного времени

Объем извержения – 11 куб. км в тв.экв.



Оценки газовых выбросов крупнейших исторических извержений

Извержение	SO ₂ , Mt	H ₂ SO ₄ , Mt	H ₂ O, Mt	Total (no CO ₂), Mt	Reference
Тамбора, Индонезия, 1815 г. 50 км³ DRE	55.6	85.1	12 195	12 336	Oppenheimer et al., 2014, Volcanic degassing
Хуайнапутина, Перу, 1601 г. 11 км³ DRE	67.6	103	14800	14 980	Diettrich, de Silva, 2010
Кракатау, Индонезия, 1883 г. 10 км³ DRE	29.8	45.6	6 530	6 609	Oppenheimer et al., 2014, Volcanic degassing
Пинатубо, Филиппины, 1991 г. 5 км³ DRE	19.9	30.4	4 355	4 406	Oppenheimer et al., 2014, Volcanic degassing
Катмай-Новарупта, Аляска, 1912 г. 15 км³ DRE	20.1	30.7	4 400	4 450	Oppenheimer et al., 2014, Volcanic degassing

Для сравнения выбросы SO₂ некоторых стран в 2005 году:
 Китай – 24 Мт
 США – 10 Мт
 Россия – 10 Мт
 Франция 0.6 Мт

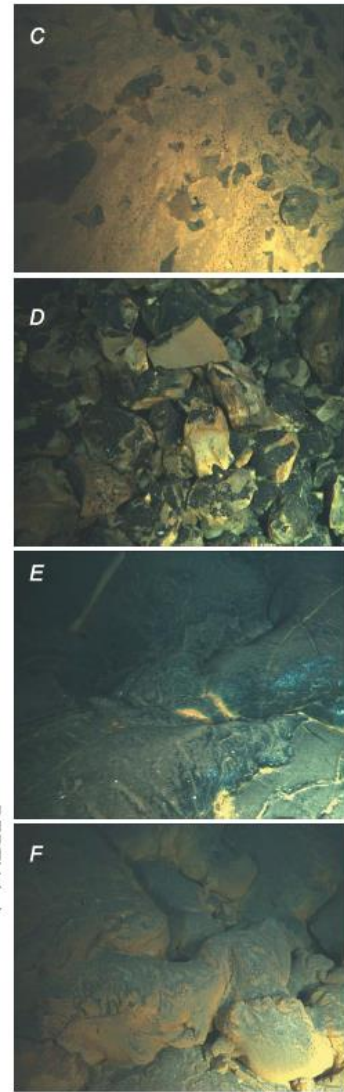
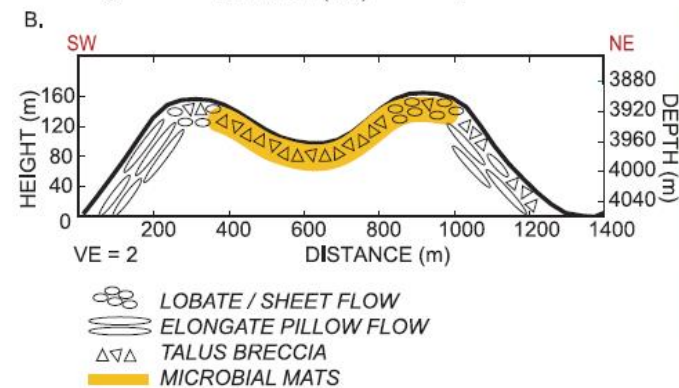
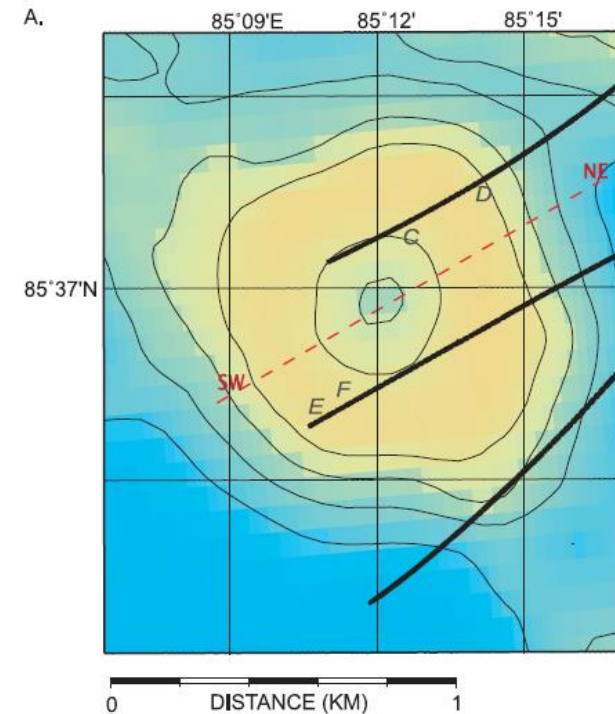
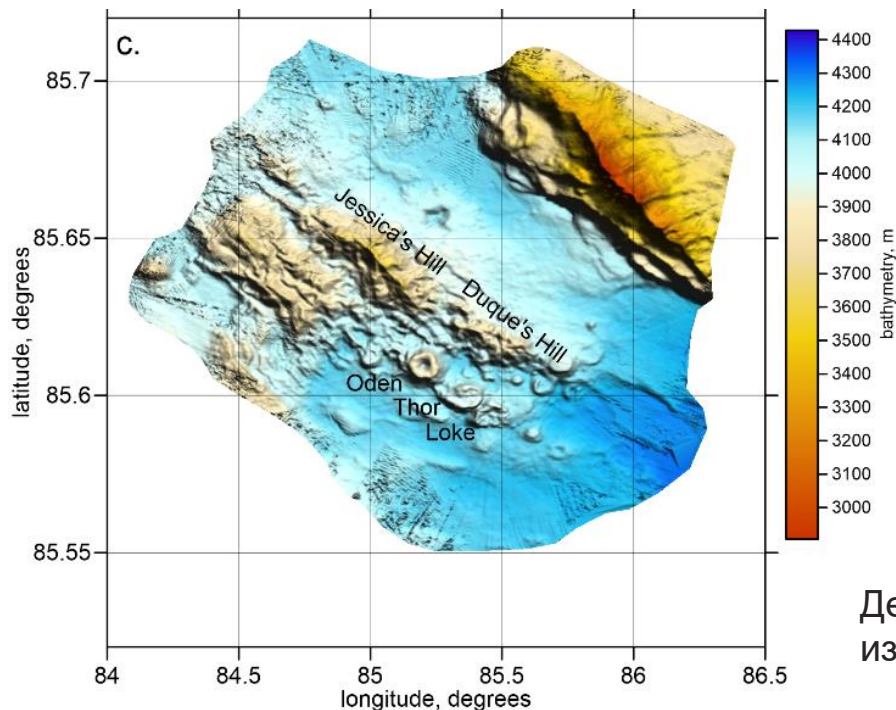
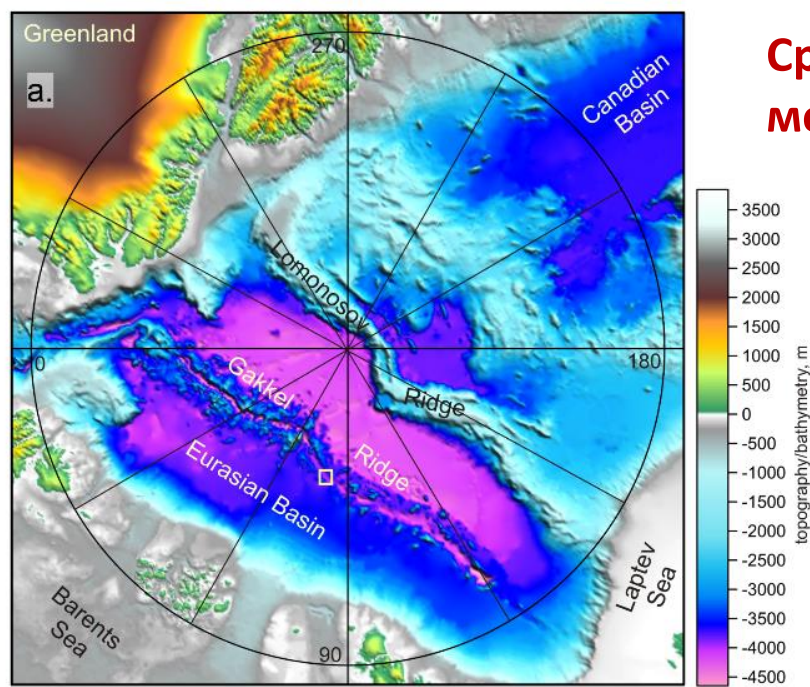
В гигантских кальдераобразующих извержениях основным «взрывчатым веществом» является вода. Все другие газы меньше 1%. Поэтому долгосрочного парникового эффекта эти извержения не оказывают.

Срединно-океанические хребты являются зонами активного вулканизма и могут также производить значительную газовую эмиссию

Имеются свидетельства, что на сегменте 85°Е хребта Гаккеля в 1999 году произошло мощное эксплозивное извержение.

Оценки показывают, что для того, чтобы обеспечить взрывной характер на глубине около 4000 м, содержание газа в магме должно быть более 10%, что было подтверждено результатами драгирования и видео анализа пирокластических потоков на дне.

Детальная батиметрия в районе извержения



Форма конуса Один, где произошло извержение, и кадры видео съемки пород пирокластических потоков (Sohn et al., 2008, Nature; Pontbriand et al., 2012)

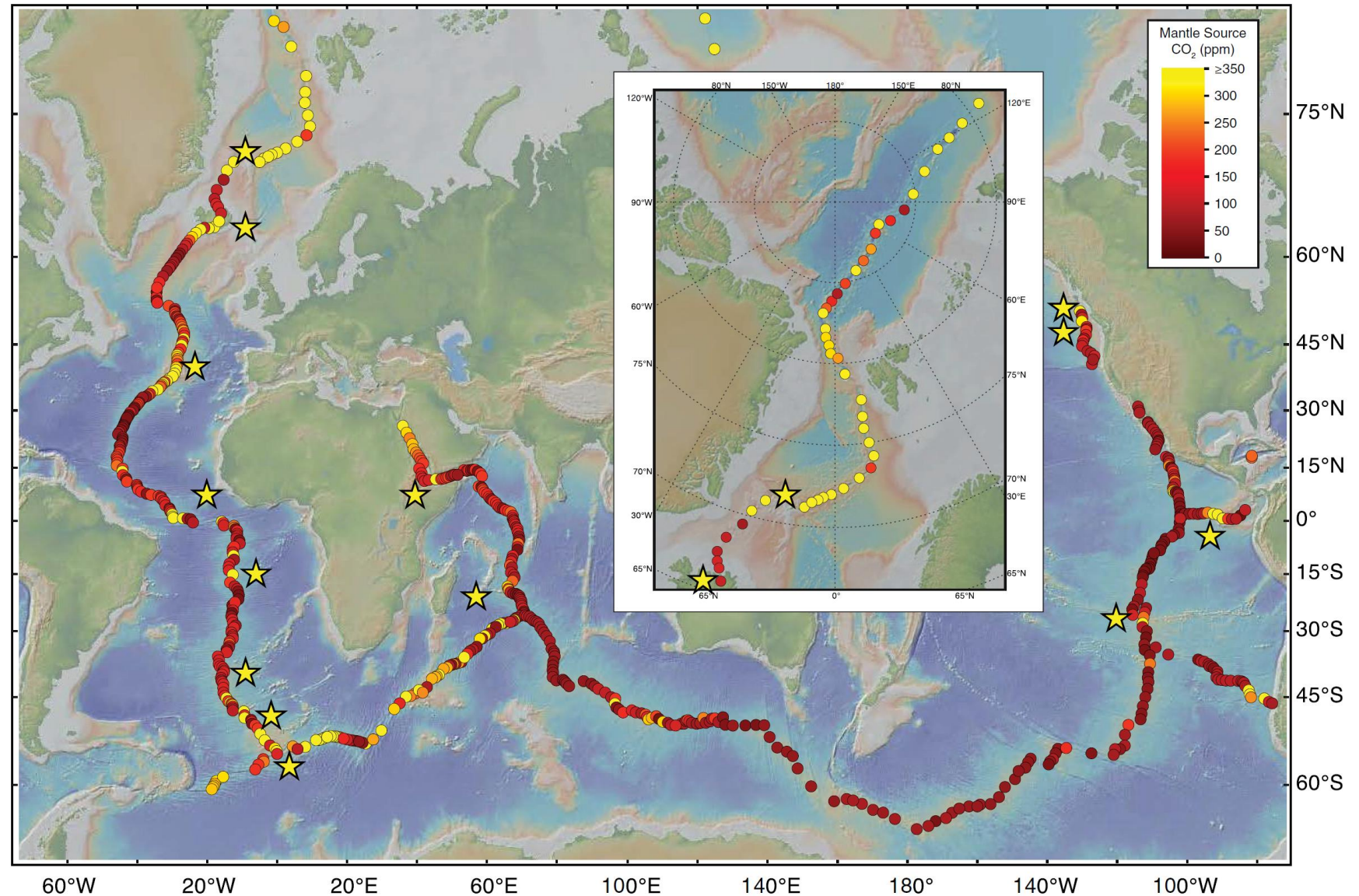
Эмиссия CO₂ в срединно-океанических хребтах (СОХ)

СОХ является крупнейшей постоянно действующей вулканической структурой на Земле. Производит вынос 16.5 км³ магматического материала в год.

На карте показаны источники эмиссии CO₂ на СОХ. Видно, что максимальные значения в районах горячих точек и в некоторых изолированных сегментах (напр., в Арктике).

Общий поток CO₂ в СОХ составляет:
1.32 10¹² моль/год или
66 Мт/год

Hauri, E. H., et al. (2019). Carbon in the convecting mantle. *Earth's Deep Carbon: past to present*. Cambridge.



Однако, значительная часть выделенного CO₂ может раствориться в океанской воде и не дойти до атмосферы

Суммарный выброс CO₂ вулканами, оцененный за 2005-2017 годы:

Пассивный выброс газов из вулканов – 51.3 Мт/год

Взрывные извержения – 1.8 Мт/год

Диффузная эмиссия CO₂ на вулканах – 93 Мт/год

Выброс CO₂ на зонах спрединга на COX < 66 Мт/год

ВСЕГО: 212 Мт/год (Fischer et al., 2019)

В отчете Deep Carbon Observatory приводятся оценки 280-360 Мт/год.

Крупные извержения с глобальным эффектом случаются примерно раз в 100 лет. Они оказывают краткосрочный эффект на климат, однако выброс парниковых газов относительно небольшой.

Вклад вулканов в 100-150 раз меньше антропогенного фактора (38 000 Мт/г)

Спасибо за внимание



Извержение Пинатубо,
Филиппины, 1991 год

Методика расчетов общего выброса CO₂ из вулканов в Fischer et al. (2019).

898 volcanoes (Syracuse and Abers, 2006)

Strong emitter volcanoes
SO₂ detected by
remote sensing

Weak emitter volcanoes
SO₂ not detected by remote sensing

C/S
measured
22.9 Tg/y

C/S
extrapolated
13.1 Tg/y

measured
CO₂ flux
0.07 Tg/y

hydrothermal
CO₂ flux
3.7 Tg/y

magmatic
CO₂ flux
11.5 Tg/y

not
degassing
0 Tg/y

1 Tg = 1 Mt

36.0 ± 2.4 Tg CO₂/y
123 volcanoes

+

15.3 ± 5.1 Tg CO₂/y
371 volcanoes

→

51.3 ± 5.7 Tg CO₂/y
Passive degassing

Пассивная эмиссия газов
из неизвергающихся
вулканов: 51.3 Mt/yr

89 Erupting
volcanoes (2005 – 2017)
SO₂ detected by remote
sensing

→

C/S close to
eruption
1.1 Tg
CO₂/y

+

C/S
extrapolated
0.7 Tg CO₂/y

→

1.8 ± 0.9 Tg/y
Eruptive degassing

Выброс газов по ходу
извержений: 1.8 Mt/yr

Schematic diagram of how fluxes were calculated and estimated. Green fields indicate measured values, yellow fields indicate estimated or extrapolated values. Numbers are the results as discussed in text with final uncertainties.