Современные методы дистанционного анализа вулканогенного диоксида серы

Мельников Д.В., Ушаков С.В
Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН
dvm@kscnet.ru

Основные вулканогенные газы (H_2O, CO_2, SO_2, HCl, HF и H_2S) предоставляют важную информацию о составе магмы, её объёме, накоплении и движении.

Изменение во времени отношений CO_2/SO_2 и HCl/SO_2 является ключом к пониманию системы магматического питания вулканических аппаратов.

Основные направления отбора и анализа газа:

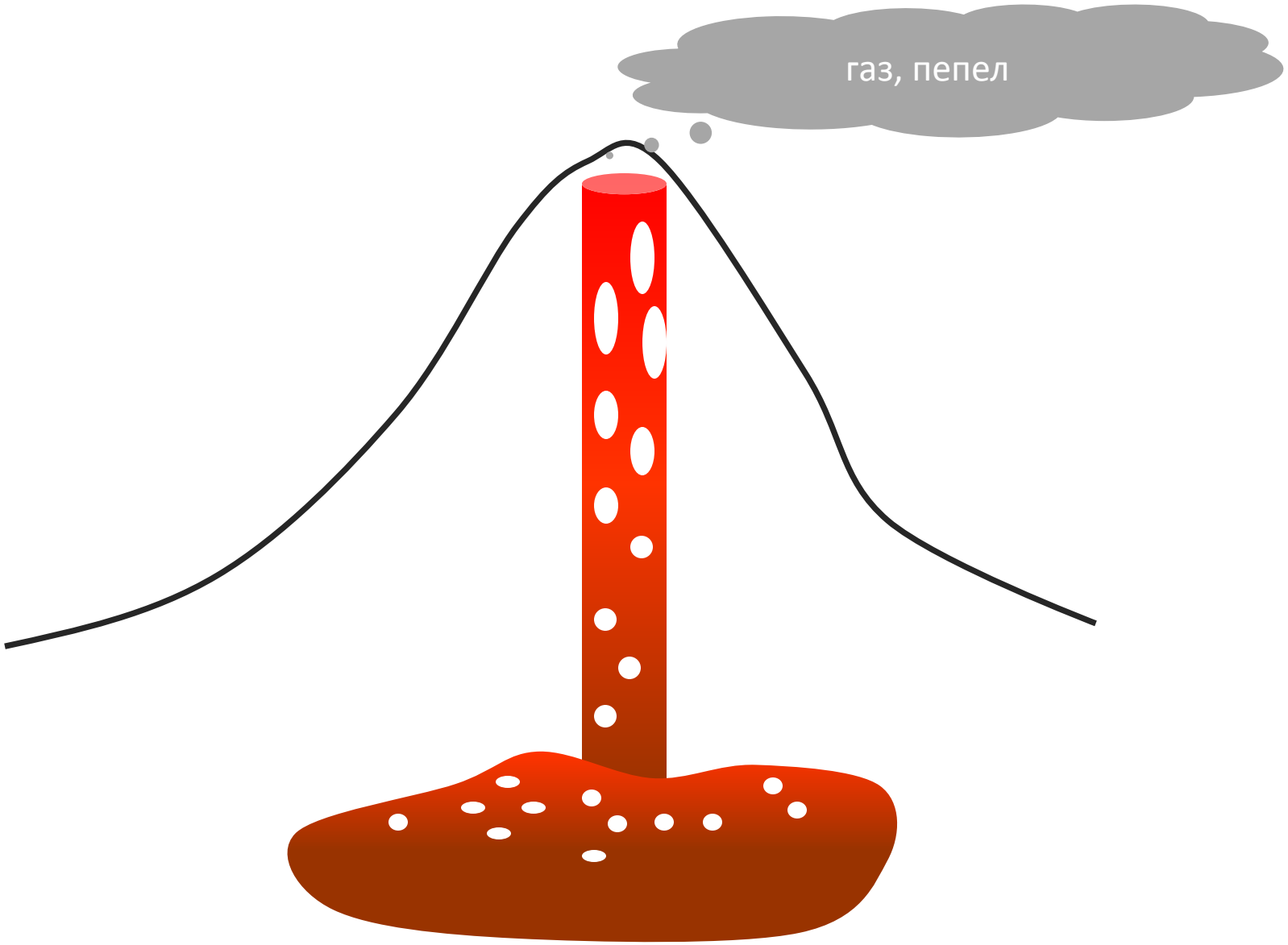
-Классические методы прямого отбора газа

-Спутниковые системы анализа газа (в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне)

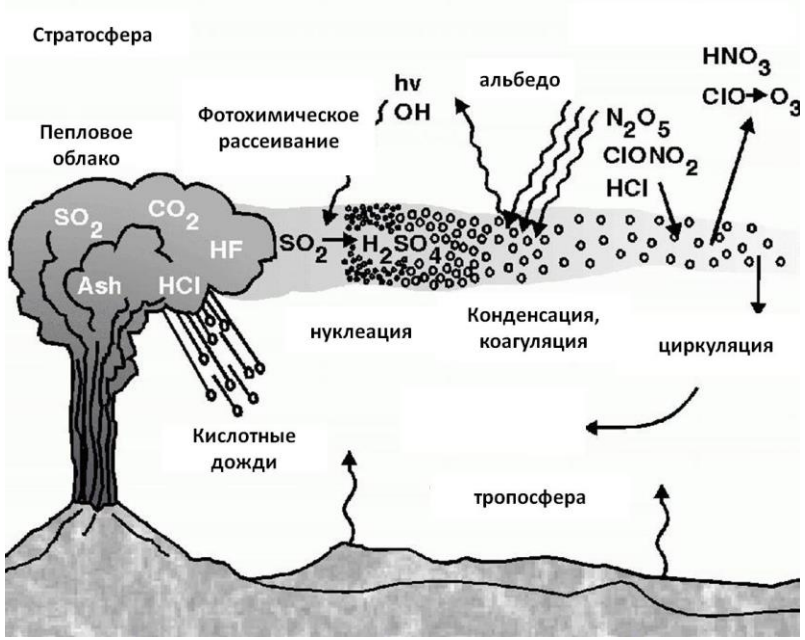
-Наземные дистанционные методы (в ультрафиолетовом и инфракрасном диапазоне)

Примеры концентраций вулканических газов
(from Symonds et. al., 1994)

Вулкан Температура	**Kilauea Summit** 1170°C	**Erta` Ale** 1130°C	**Momotombo** 820°C
H_20	37.1	77.2	97.1
$C0_2$	48.9	11.3	1.44
$S0_2$	11.8	8.34	0.50
H_2	0.49	1.39	0.70
CO	1.51	0.44	0.01
H_2S	0.04	0.68	0.23
HCl	0.08	0.42	2.89
HF	---	---	0.26


газ, пепел

Дистанционные методы анализа вулканогенного SO_2



UV диапазон ~290-315 нм
Наземные системы: COSPEC, DOAS
Спутниковые системы: OMI, OMPS, GOME, SCIAMACHY, TOMS

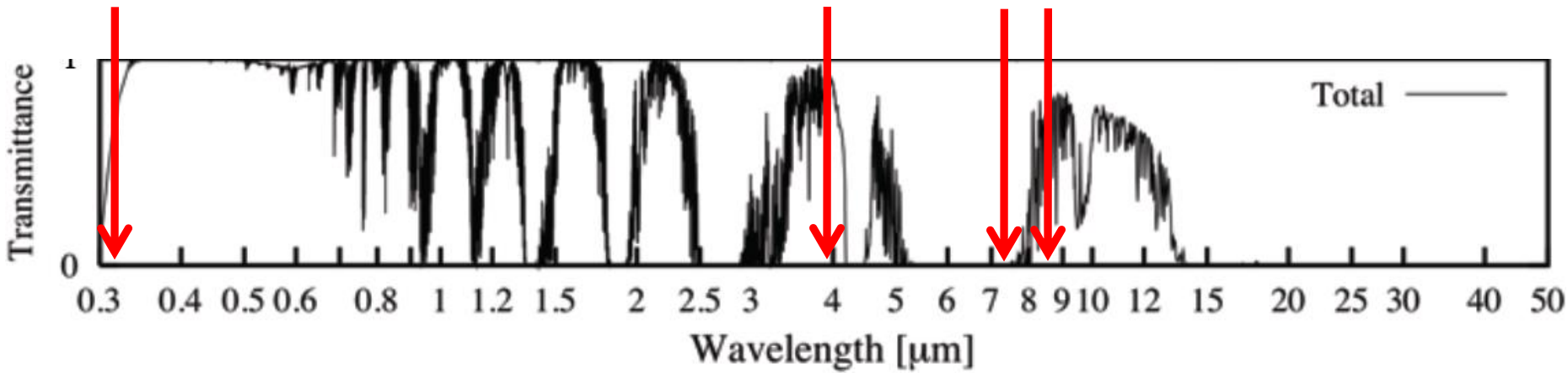
IR диапазон ~7.3, 8.6 мкм (центр полосы)
Наземные системы: FTIR
Спутниковые системы: AIRS, MODIS, ASTER, IASI, TOVS

OMI, OMPS, GOME, SCIAMACHY, TOMS

AIRS, MODIS, ASTER, IASI, TOVS

290-315 нм

4 мкм 7.3 мкм 8.6 мкм

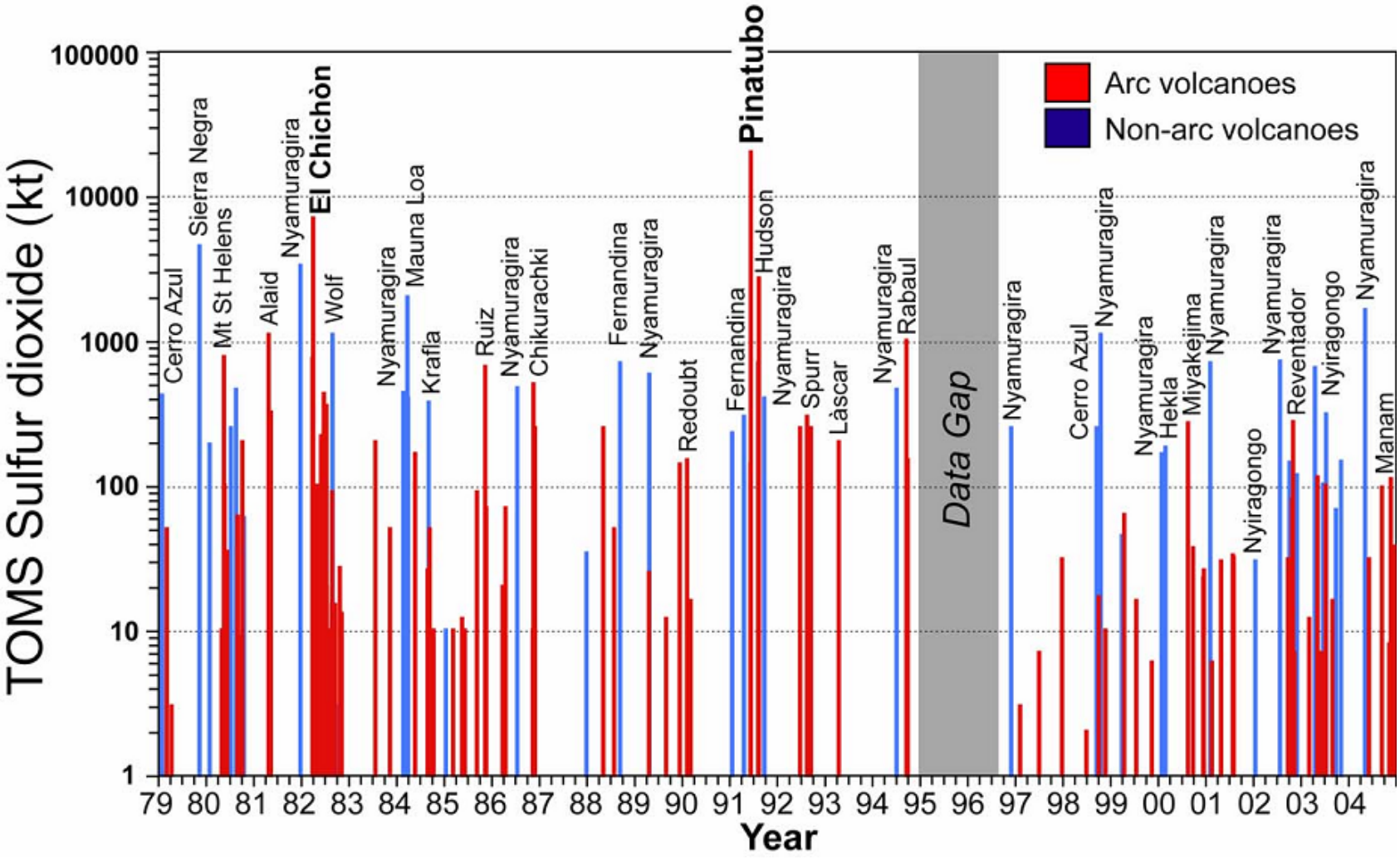


Источники SO2 в атмосфере

Источник	Сумма
Вулканизм	14.000
Дегазация при извержениях	500-4.000
Пассивная дегазация	5.000-10.000
Диметилсульфид (вода и суша)	18.500
Сжигание биомассы	2.500
Использование органического топлива и промышленность	66.800
Всего (килотонн/год)	101.800

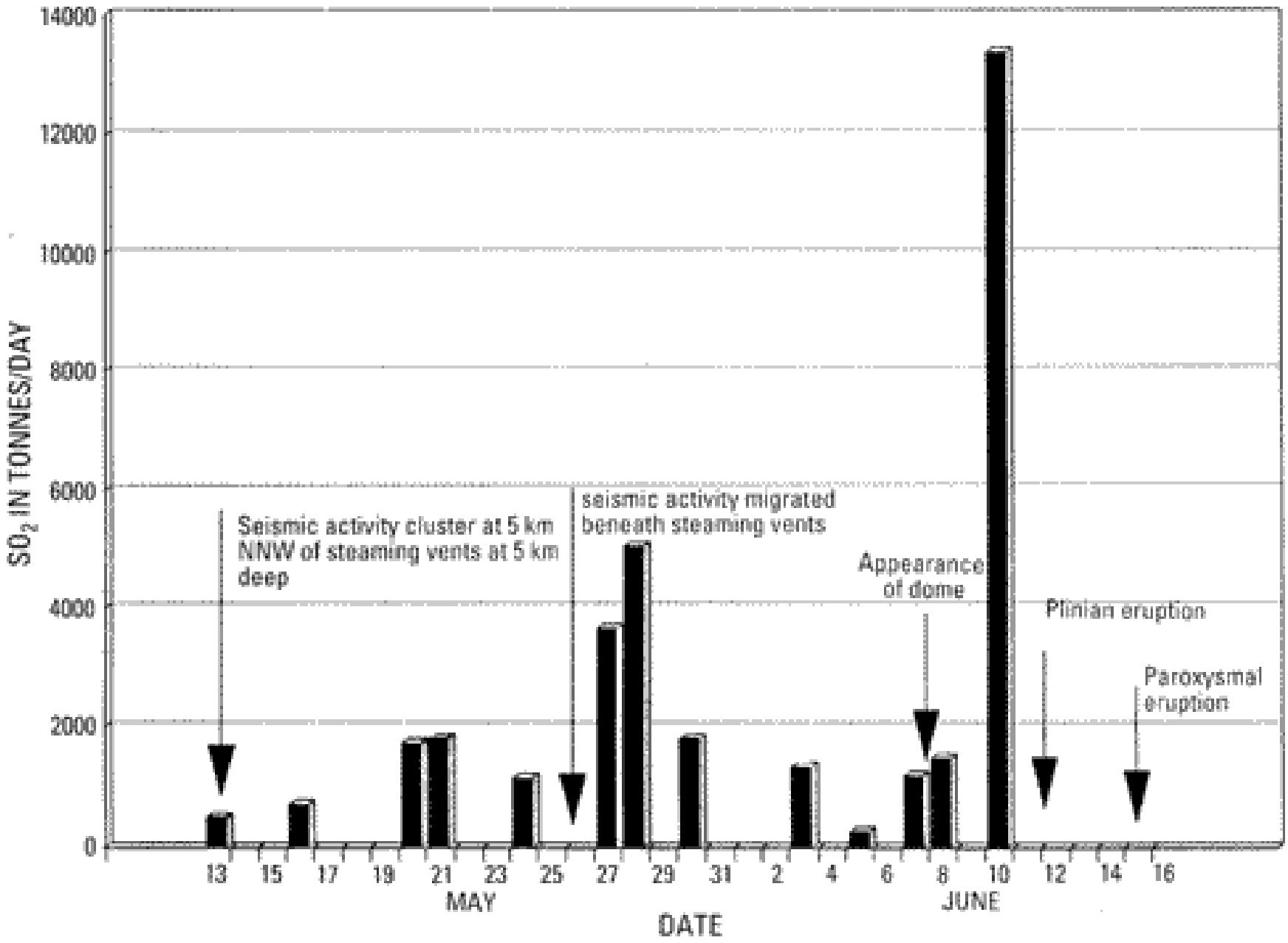
(Andres and Kasgnoc, 1998; Krotkov, 2005)

TOMS

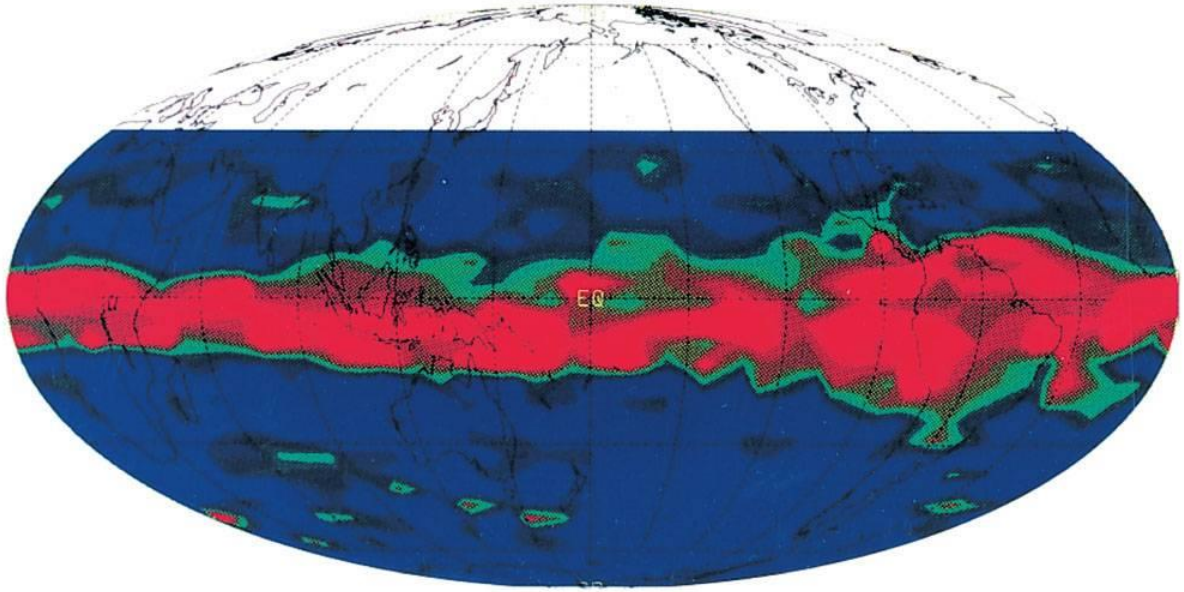


TOMS, наблюдения за концентрациями SO2 при эксплозивных извержениях вулканов с 1979 по 2005 годы (http://toms.umbc.edu)

Извержение вулкана Пинатубо, 1991 г.

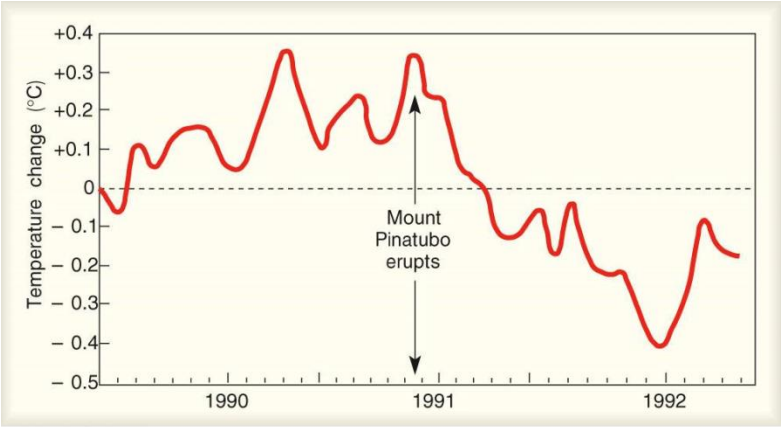

14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
SO_2 IN TONNES/DAY
Seismic activity cluster at 5 km NNW of steaming vents at 5 km deep
seismic activity migrated beneath steaming vents
Appearance of dome
Plinian eruption
Paroxysmal eruption
13
15
17
19
21
23
25
27
29
31
2
4
6
8
10
12
14
16
MAY
JUNE
DATE

8 августа 1991, аэрозольный слой



© 2007 Thomson Higher Education

- **Mt. Pinatubo (1991) извержено 20 млн. т. диоксида серы**

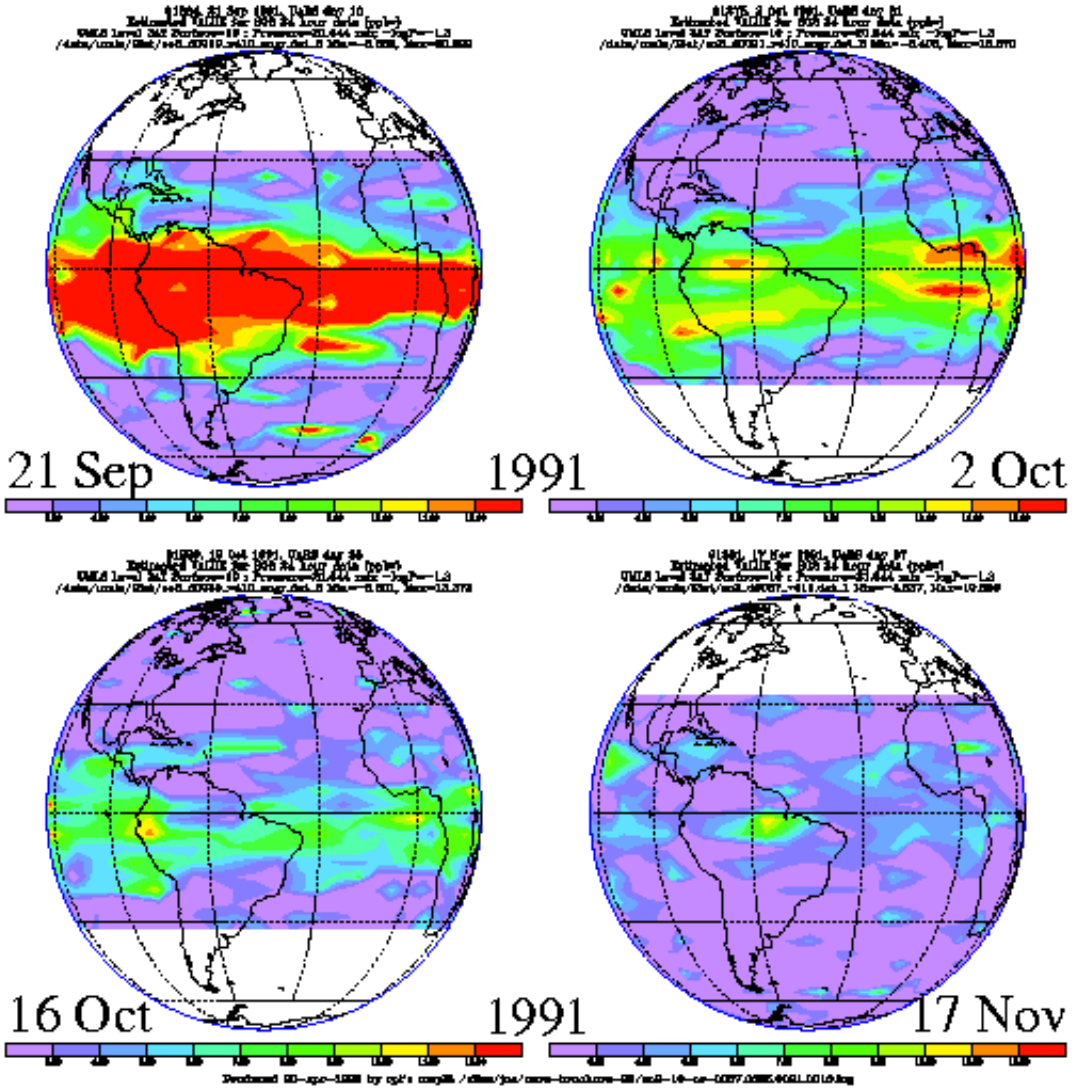


© 2007 Thomson Higher Education

Климатические изменения

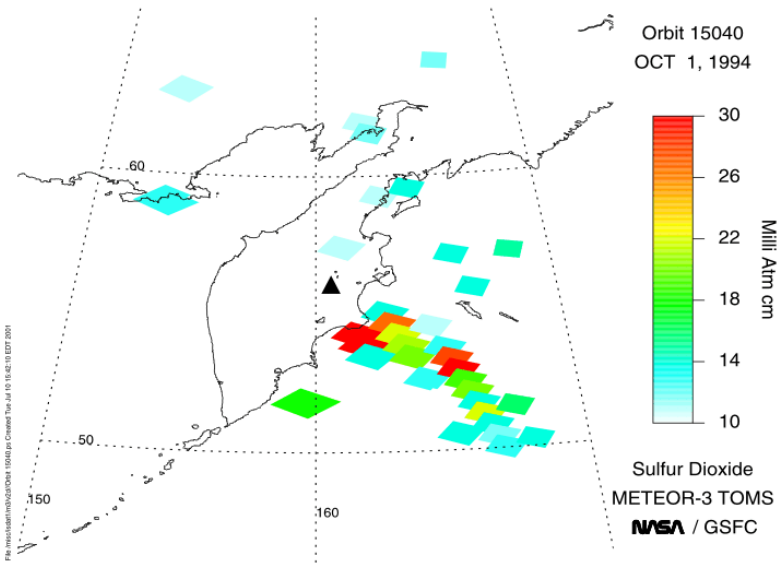
Температура уменьшилась 0.2-0.5°C за период 1-3 года после извержения

UARS MLS Measurements of SO2 from the Pinatubo Volcano



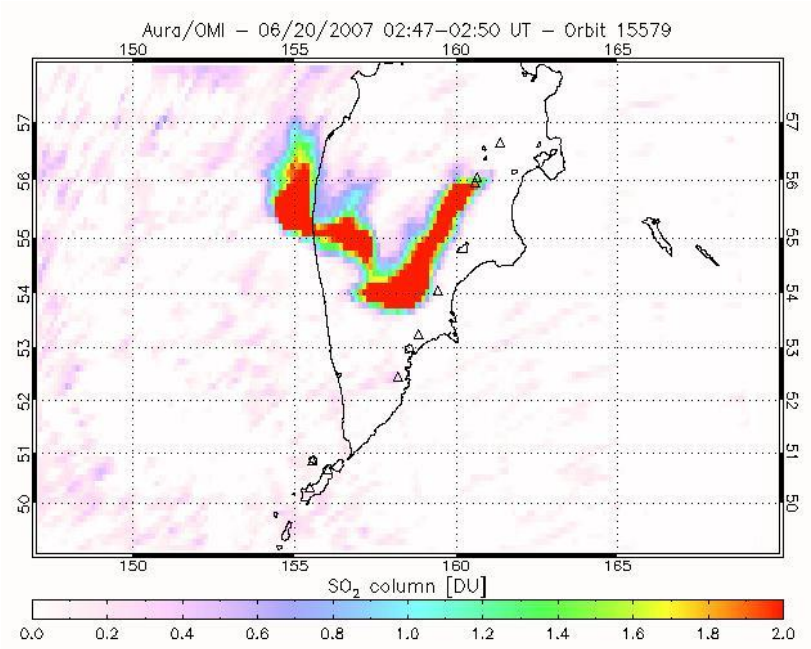
Ozone Monitoring Instrument (OMI) пришёл на смену своему предшественнику **Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)**, миссия которого продолжалась несколько десятилетий (Nimbus-7: 1978-1993, Meteor-3: 1992-1994, Earth Probe: 1996-2005)

TOMS



Извержение Ключевского вулкана
1 октября 1994

AURA

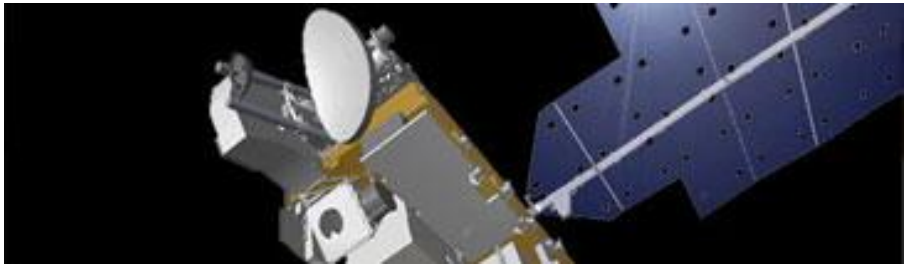


Извержение Ключевского вулкана
20 июня 2007

Ozone Monitoring Instrument (OMI)

Ozone Monitoring Instrument (OMI) установлен на борту искусственного спутника Земли **AURA** (NASA EOS), выведен на орбиту 14 июля 2004

OMI - является совместной разработкой Голландского аэрокосмического агентства, Финского метеорологического института и NASA



Характеристики

Гиперспектральны радиометр:

- 270-500 nm диапазон длины волны
- спектральное разрешение 0.5 nm
- пространственное разрешение 13x24 км/пиксель
- ширина полосы обзора 2600 км
- частота съёмки 1 сутки

Обнаружение содержащихся в атмосфере

O_3, NO_2, BrO, OClO, **SO2**, HCHO

Аэрозоли (дым, пепел, пыль)

Облачный покров

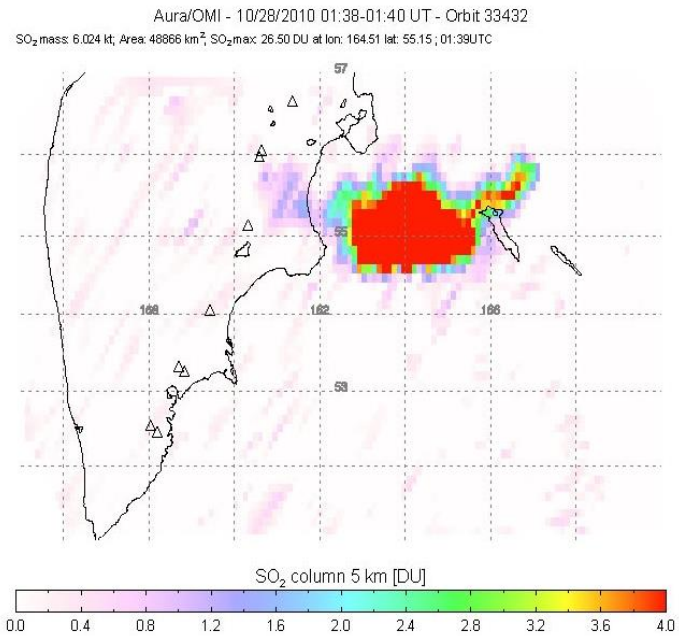
OMI/AURA

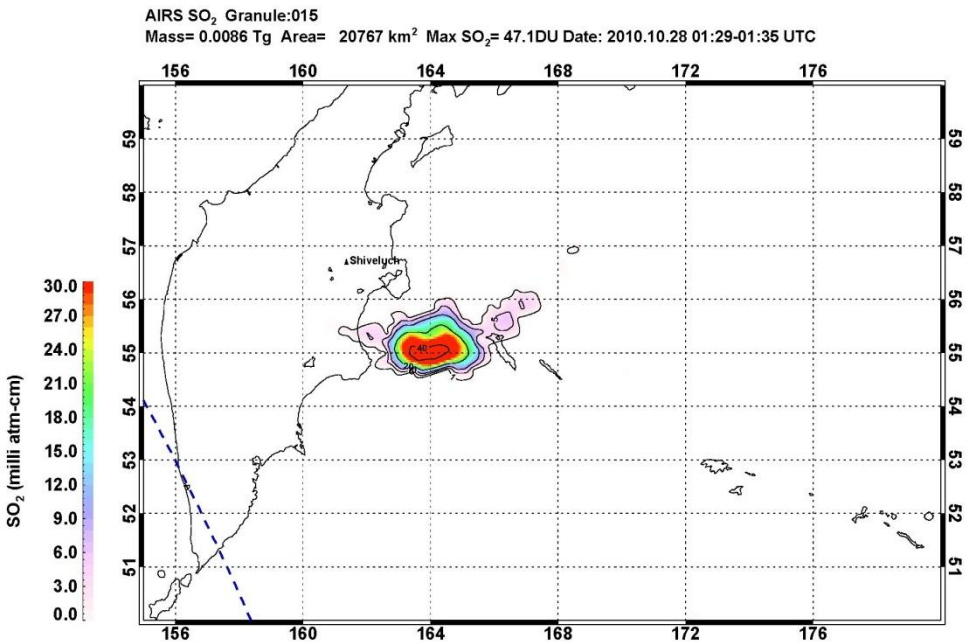
Орбита ежедневно в ~1:30 UTC

AIRS/AQUA

Орбита ежедневно в ~1-2 UTC
и в ~15-16 UTC
синхронно спектрометру MODIS

Доступность исходных данных в течении суток после прохождения орбиты





SO_2 и аэрозоли: Глобальные системы оперативных спутниковых данных

оперативность данных – первые часы после прохождения орбиты

OMI (UV) данные NOAA:
http://satepsanone.nesdis.noaa.gov/pub/OMI/OMISO2/index.html

GOME-2 (UV) данные NOAA:
http://satepsanone.nesdis.noaa.gov/pub/GOME/GOMESO2/index.html

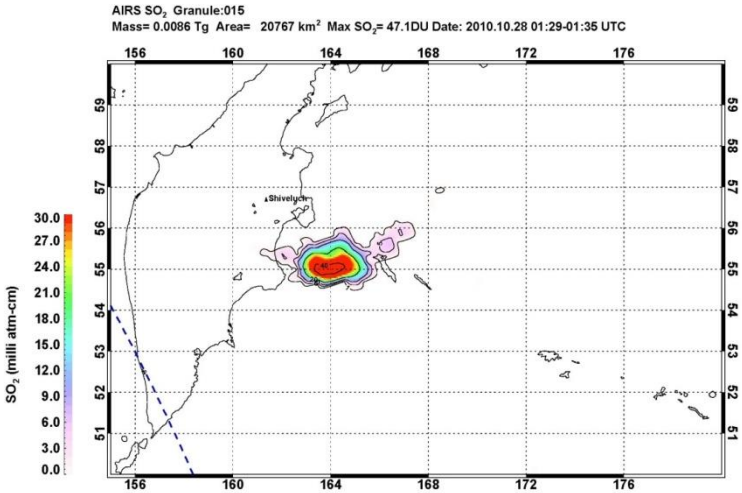
OMPS, OMI, GOME-2 и SCIAMACHY (UV) данные BIRA/IASB:
http://sacs.aeronomie.be/nrt/

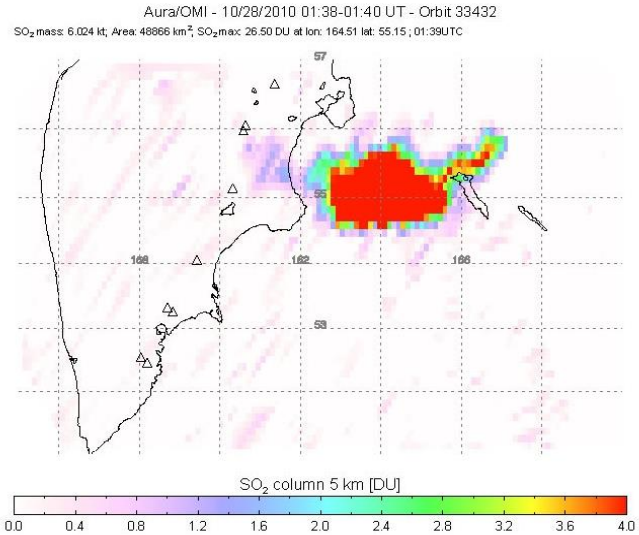
GOME-2 (UV) данные DLR:
http://wdc.dlr.de/data_products/SERVICES/GOME2NRT/so2.php?

IASI (IR) данные ULB:
http://cpm-ws4.ulb.ac.be/Alerts/index.php

AIRS (IR) данные NOAA:
http://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/spb/iosspdt/iosspdt.php?so2=1

High-resolution Absorbing Aerosol Index (AAI) данные GOME-2:
http://www.temis.nl/o3msaf/vaac_pmd/





http://so2.gsfc.nasa.gov/

Global Sulfur Dioxide Monitoring Home Page

Home | News | Documentation | Publications | Personnel | Links

Volcanic Hazards Project

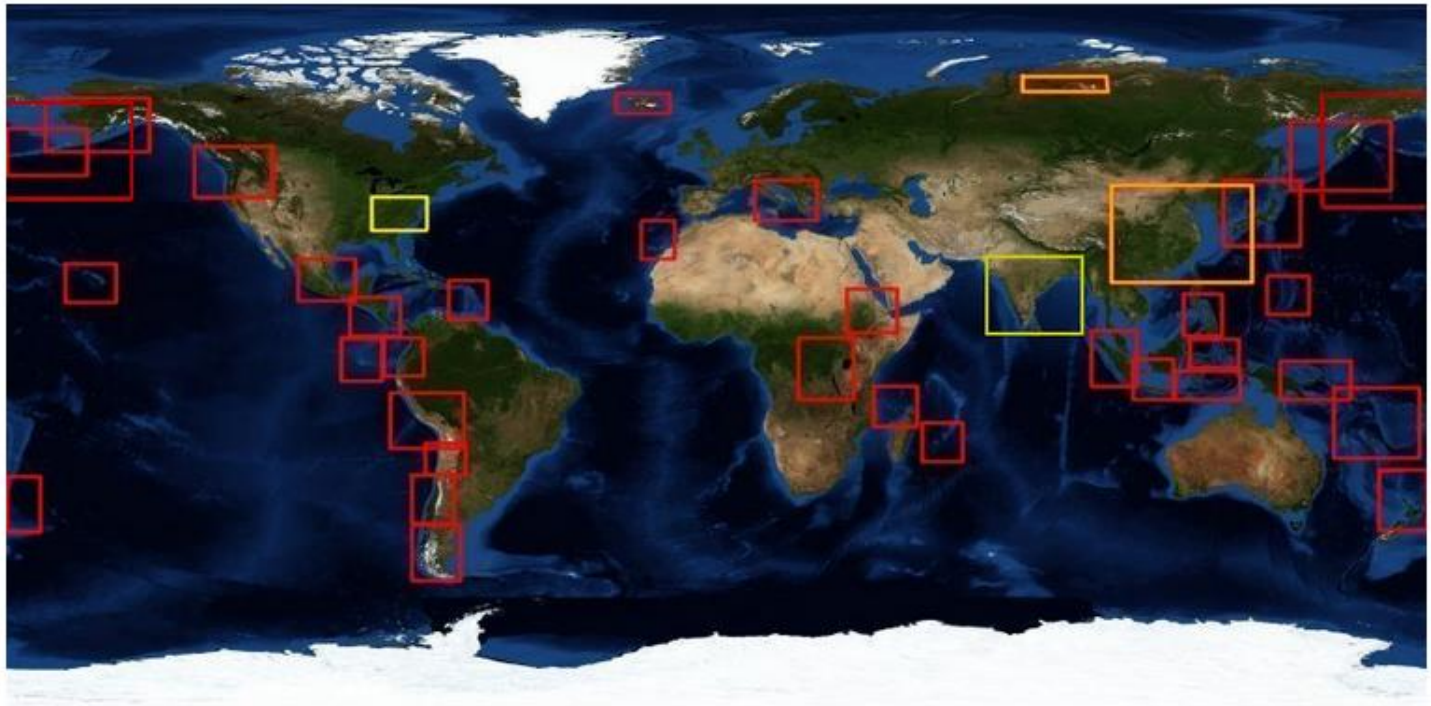
Latest SO_2 eruption alerts NOAA-NESDIS. SACS_BIRA. IASI-ULB.
SO_2 Near Real-Time Images: NASA(DR). FMI(DR). NASA(NRT). NOAA(NRT). AIRS(NRT). SACS(NRT).

MEaSUREs project:

TOMS images (1979-2005) | AIRS images (2003-present) | OMI images (2004-present) | OMPS images (May 2012-present)

Latest Daily (OMI/OMPS) Images of SO_2 (click on a highlighted rectangle)

Red = daily volcanic regions, orange = daily pollution regions, yellow = long-term pollution images



Latest GMAO Experimental forecasts of SO_2 (click outside the boxes)

Archived images

http://sacs.aeronomie.be/nrt/

SO_2 data and alert service

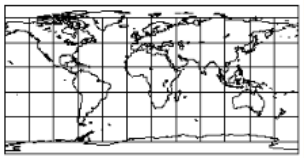
SACS

near-real time service | SO2 alert service | archive service | product info | highlights | home

Daily data at orbit coordinates

Select a date

2010 Nov 03



World view

Either click on a region in the map to submit or select a region from the list-menu and click 'submit'

000 == World view

(The menu gives per region the centre longitute and latitude)

submit

Status of the NRT processing

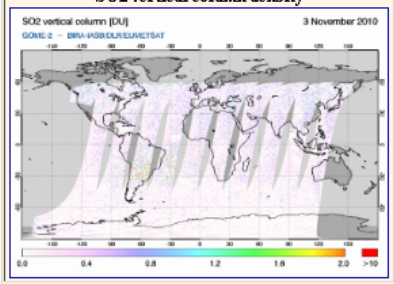
<== previous day
<== previous month
<== previous year

03 November 2010

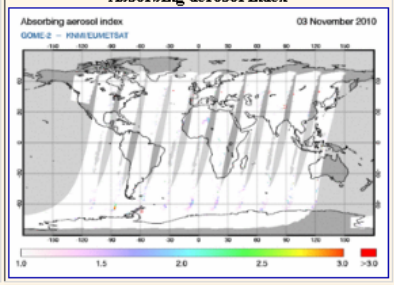
next day ==>
next month ==>
next year ==>

GOME-2

SO2 vertical column density



Absorbing aerosol index

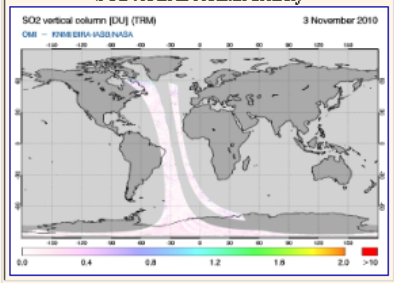


Other plots
SO2 slant column density
Cloud cover fraction

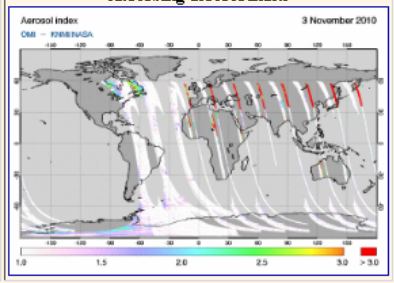
[Data file of 03 November 2010 does not exist]

OMI

SO2 vertical column density



Absorbing aerosol index

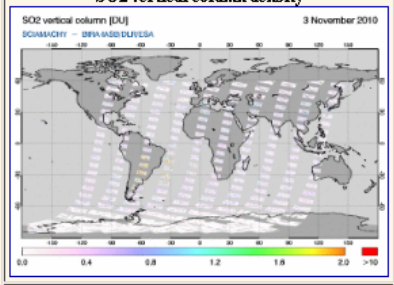


Other plots
Cloud cover fraction

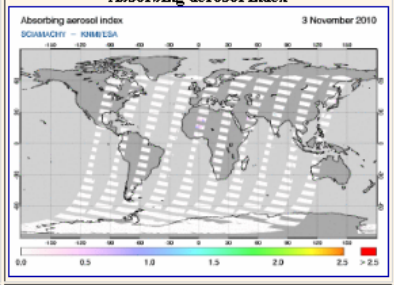
[*OMI nrt-like data files can be found at this website at NASA*]

SCIAMACHY

SO2 vertical column density



Absorbing aerosol index



Other plots
SO2 slant column density
Cloud cover fraction

Download the data file of 03 November 2010
(The data file covers the whole world)

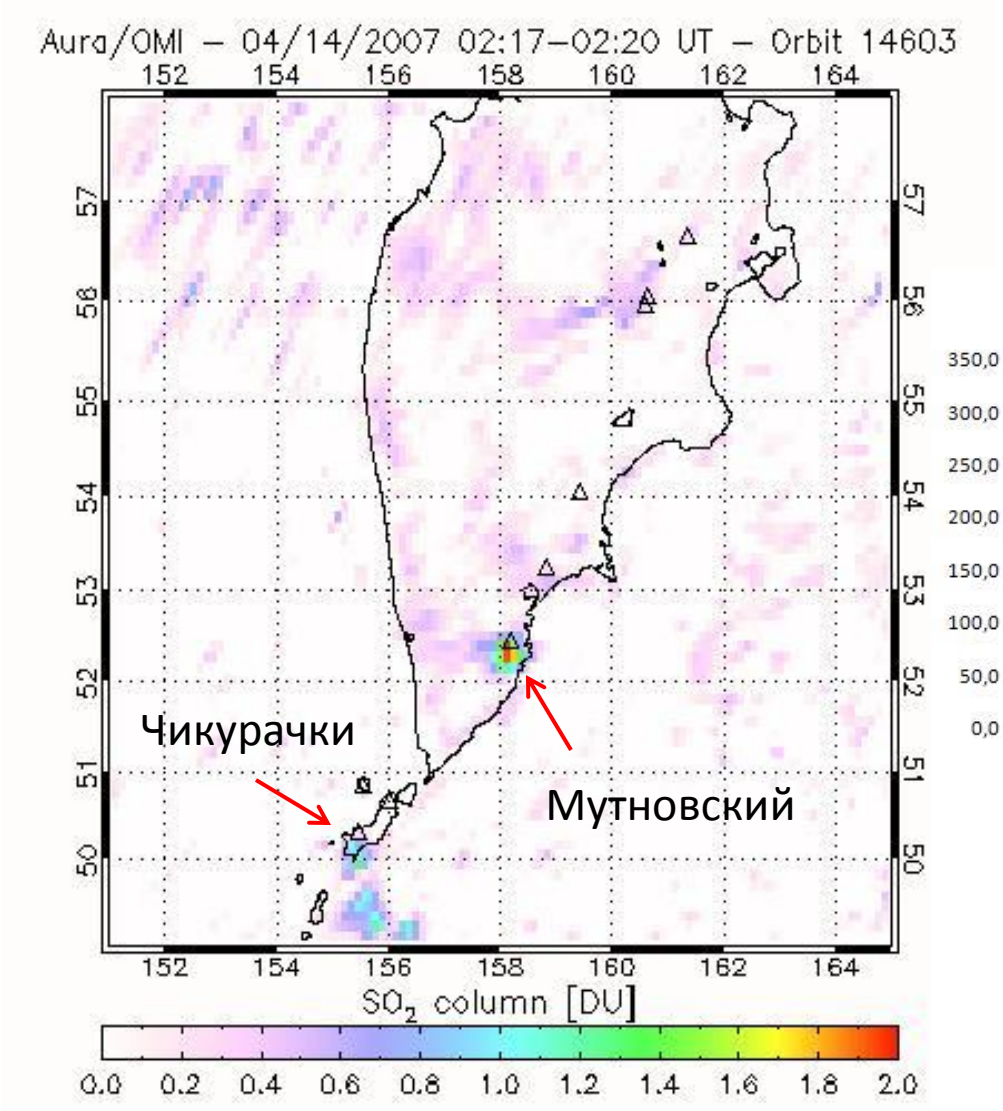
Эксплозивные извержения

-Излияние лавы, выбросы пепла
-Короткий период (часы-дни)
-Большая высота (до 40 км)
-Угроза для авиации
-Возможны глобальные климатические изменения

Пассивная дегазация

-Нет излияний лавы
-Долгий период (недели-столетия)
-Небольшая высота (до 5 км)
-Влияние на окружающую среду и здоровье человека

Пассивная дегазация



Пассивная дегазация Мутновского вулкана перед фреатическим извержением 17 апреля 2007 года

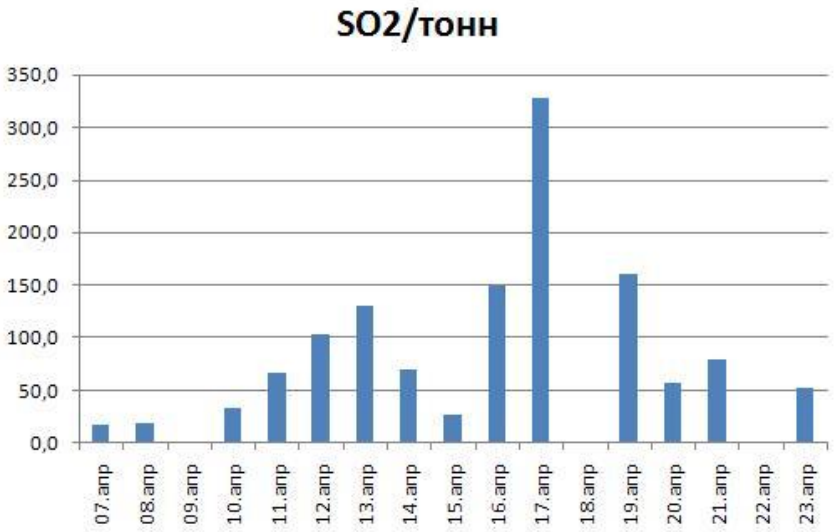
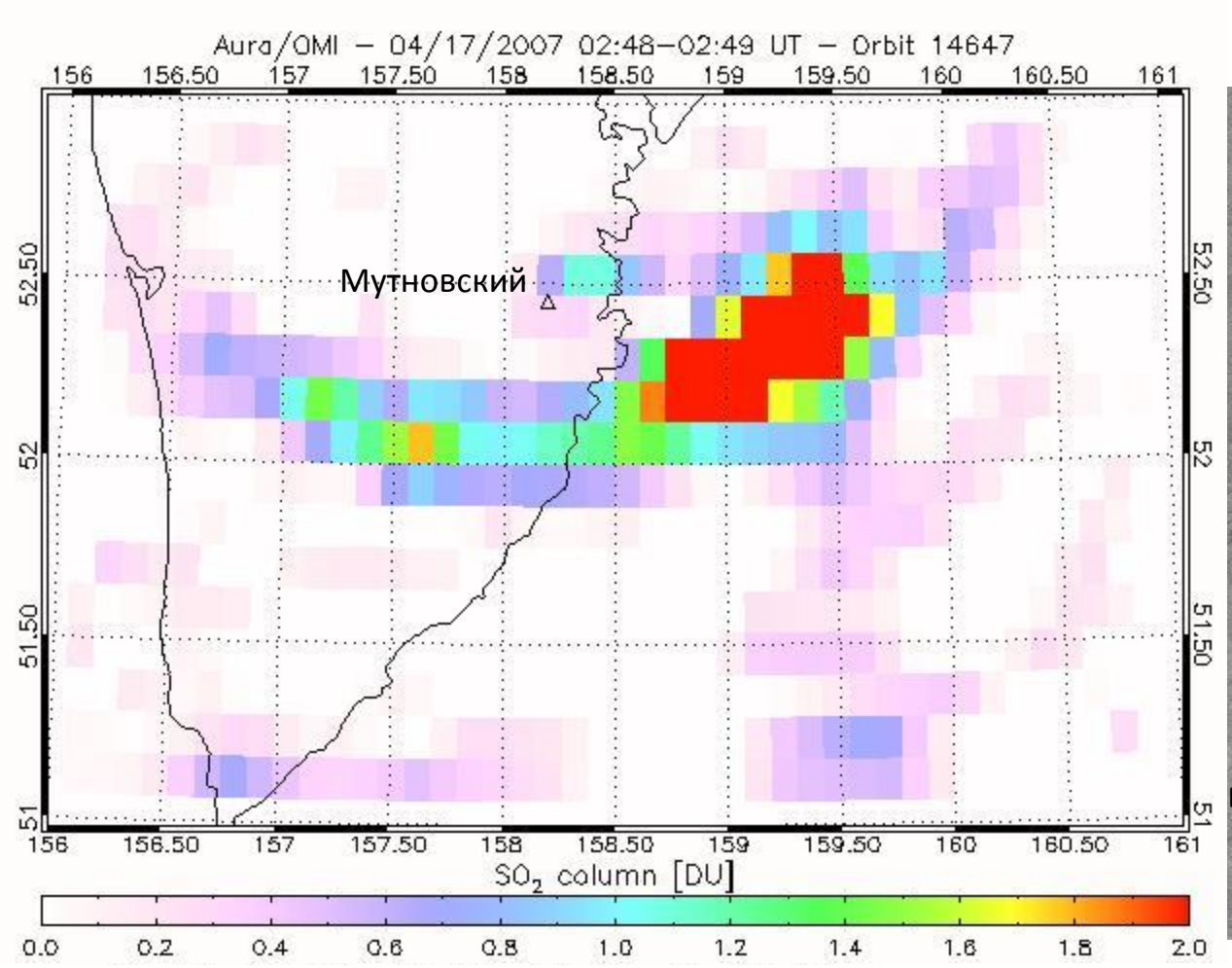
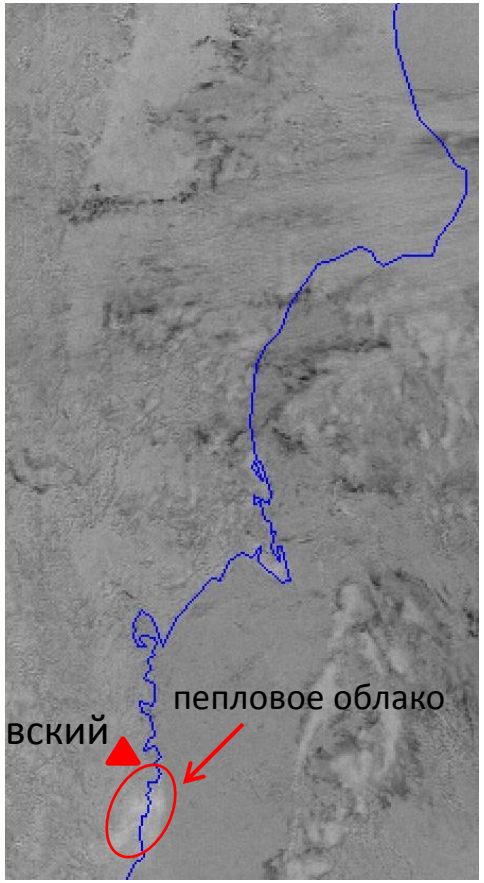


График распределения концентраций SO2 в апреле 2007 г.



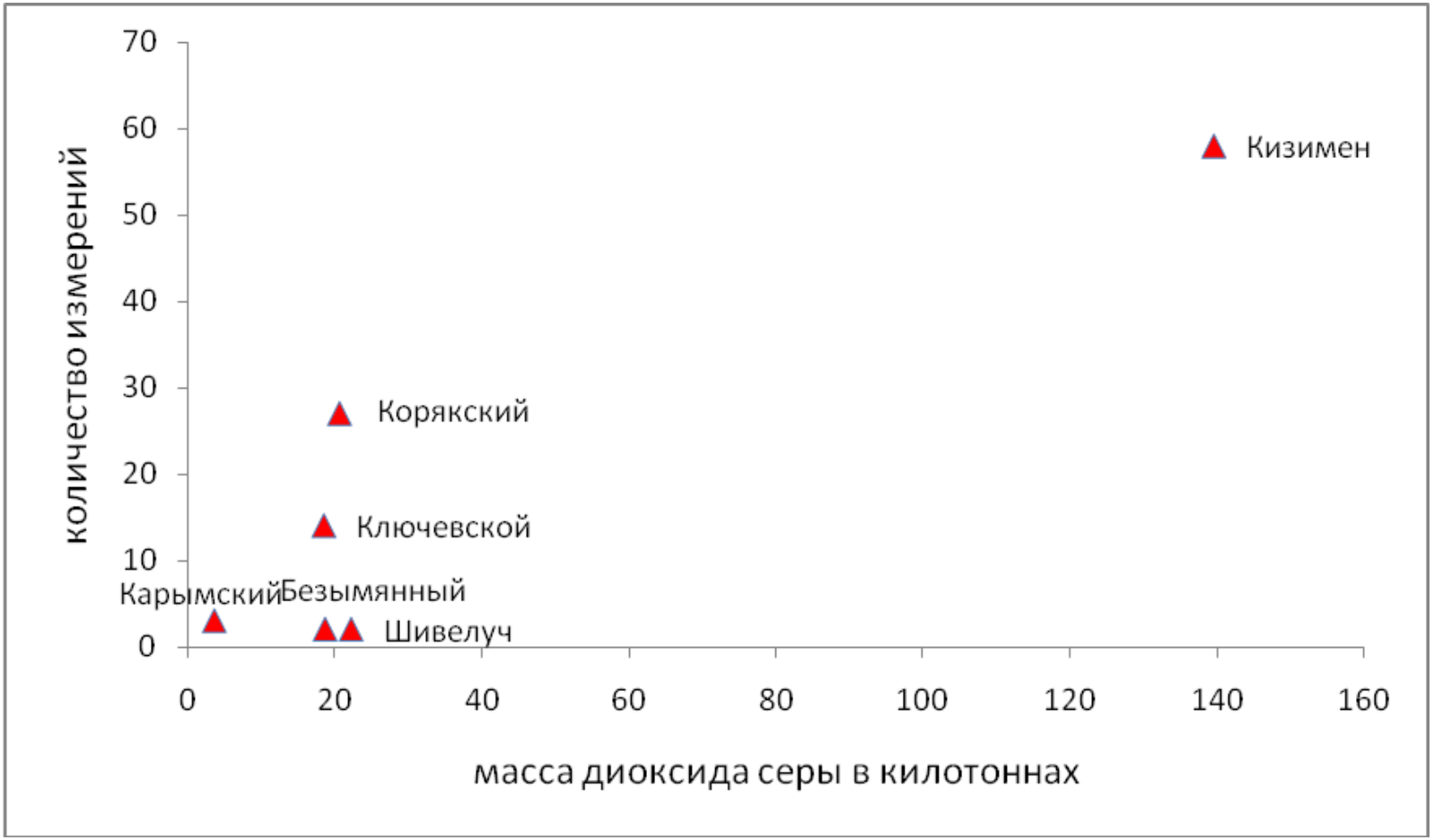


Фреатическое извержение
17 апреля 2007

Космический снимок NOAA-17 16.04.2007 23:40 UTC
(17 апреля по Камчатскому времени)
Разность каналов 4m5
Пепловое облако от Мутновского вулкана

Общая масса диоксида серы (килотонны) для извержений вулканов Камчатки в 2009-2011 гг. по данным сенсора OMI

Кизимен	Ключевской	Безымянный	Шивелуч	Корякский	Карымский
139.46	18.53	18.70	22.24	20.66	3.65

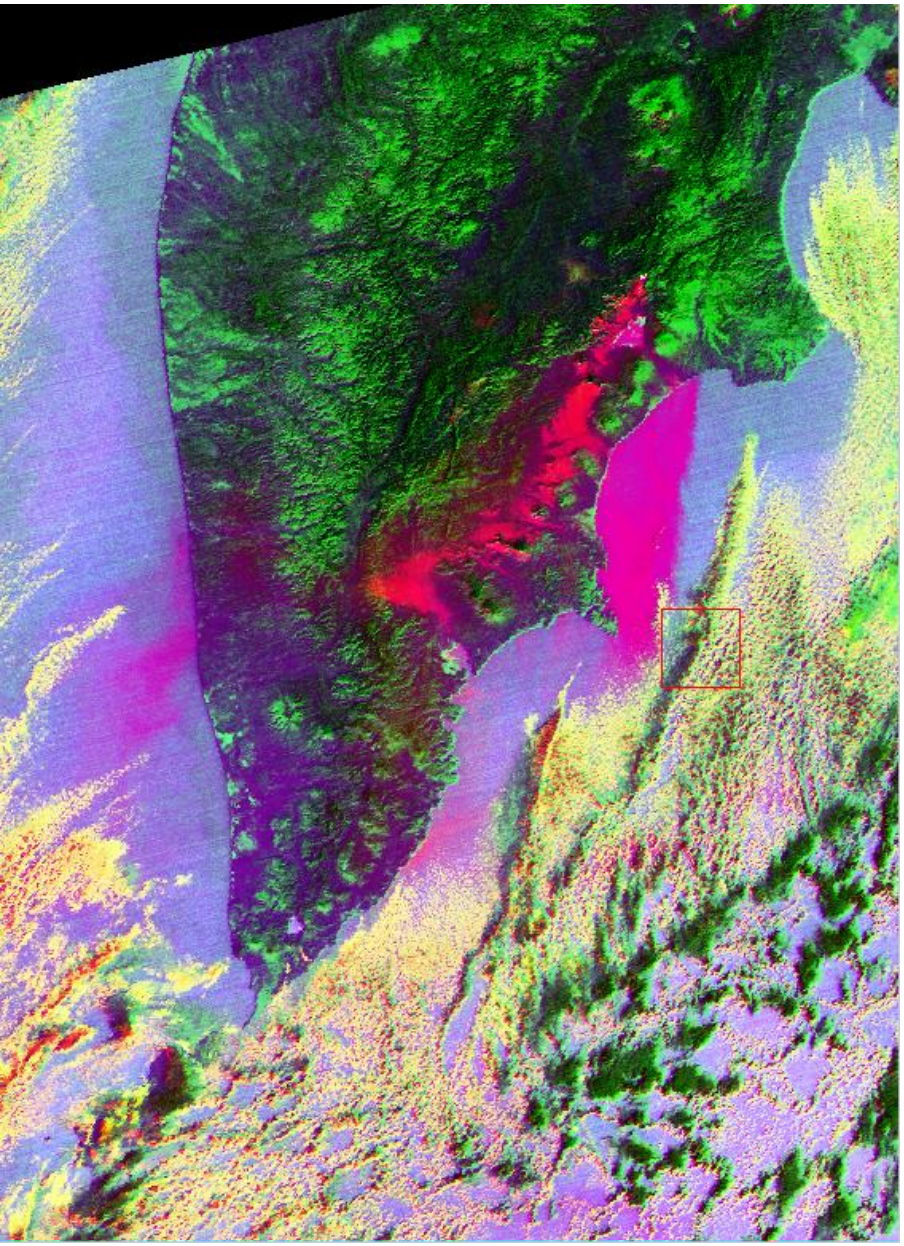


Кизимен

14 декабря 2010 г. Фото Дон Пейдж

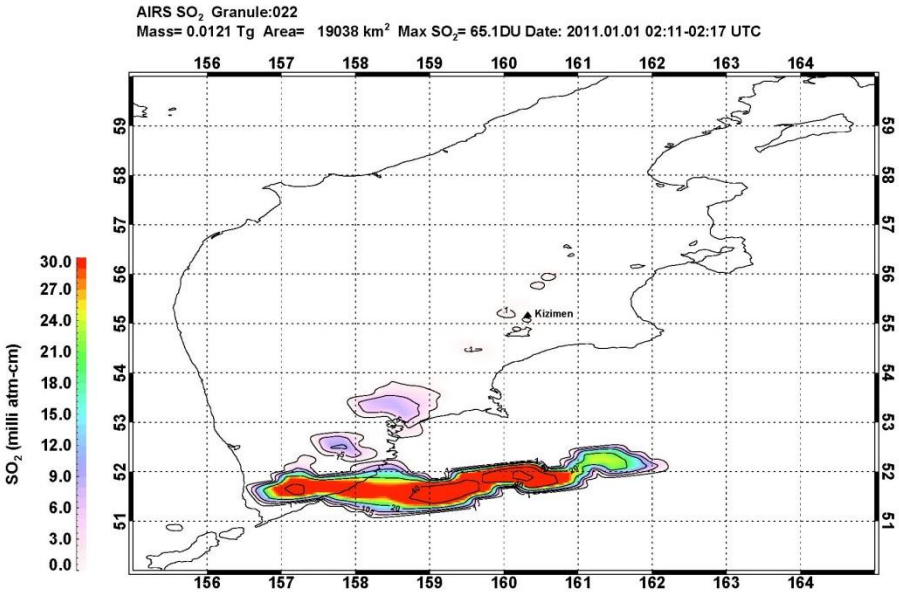
26 января 2011 г. Фото А. Сокоренко

Кизимен 01.01.2011

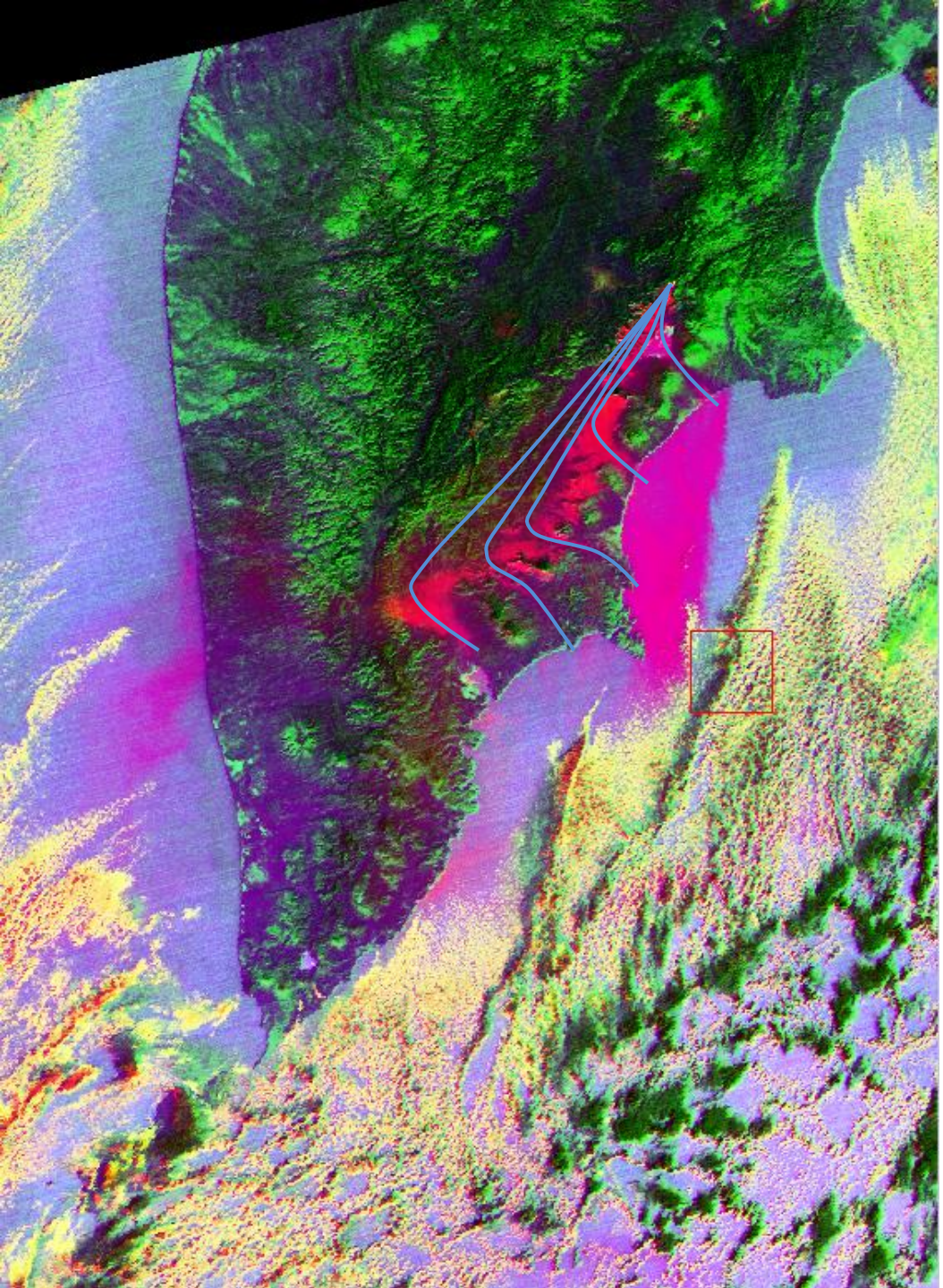


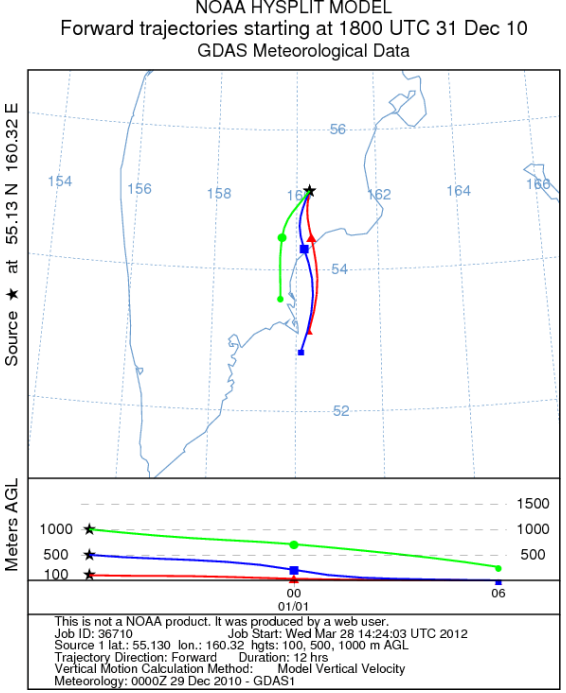
Извержение 31 декабря 2010 в 17:56 UTC
(по сейсмическим данным КФ ГС РАН)

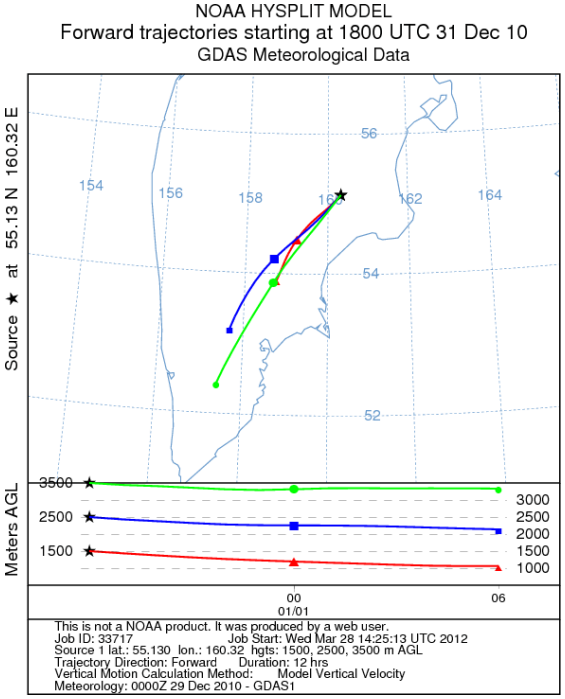
Спутниковый снимок MODIS AQUA
01/01/2010 02:10 UTC
комбинация каналов 20, 31-32, 31

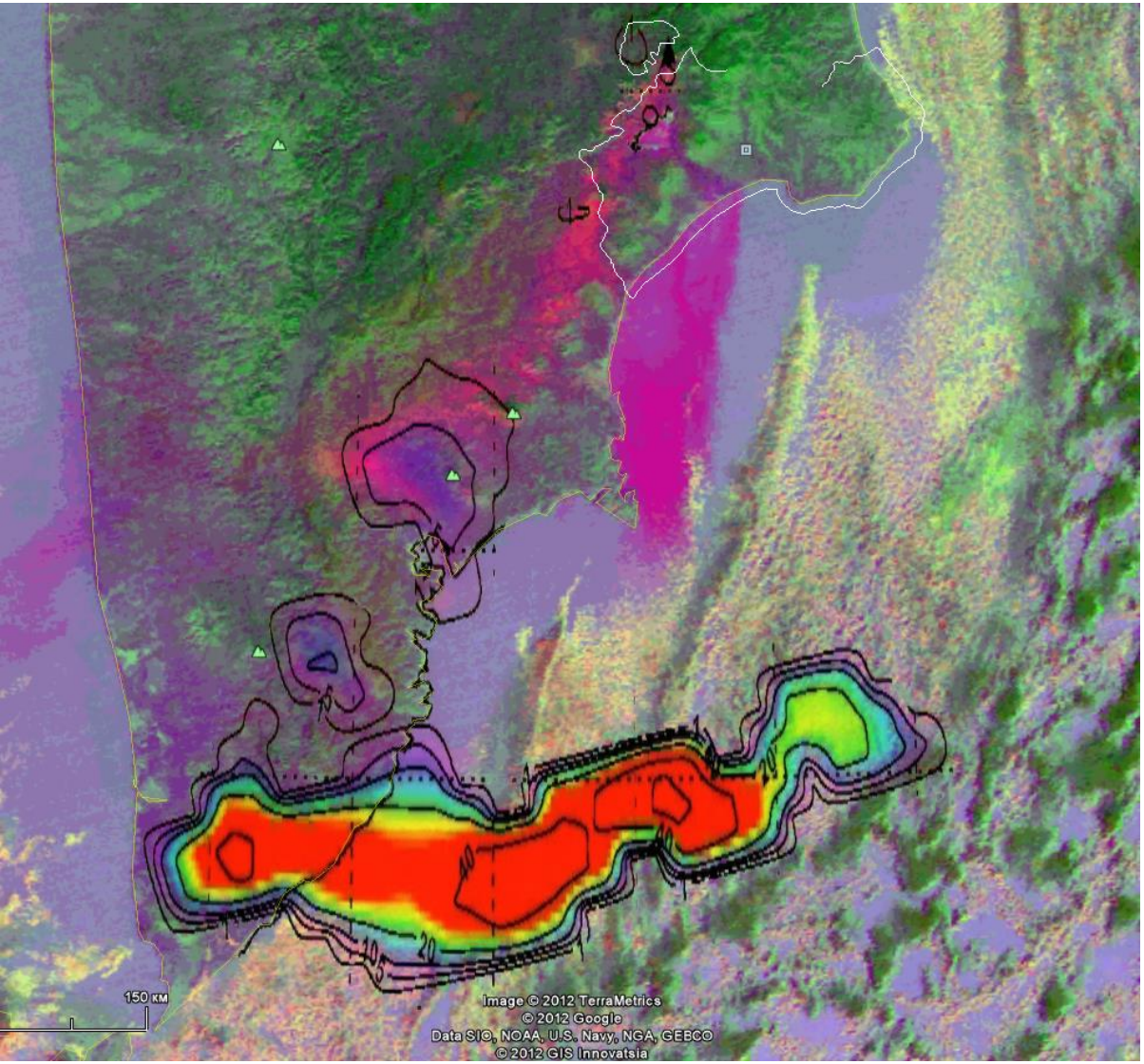


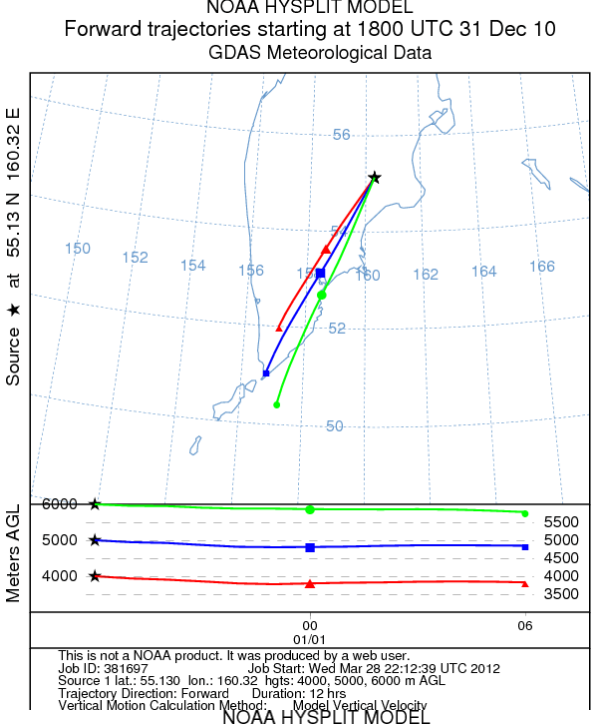
Спутниковый снимок MODIS AIRS
01/01/2010 02:10 UTC

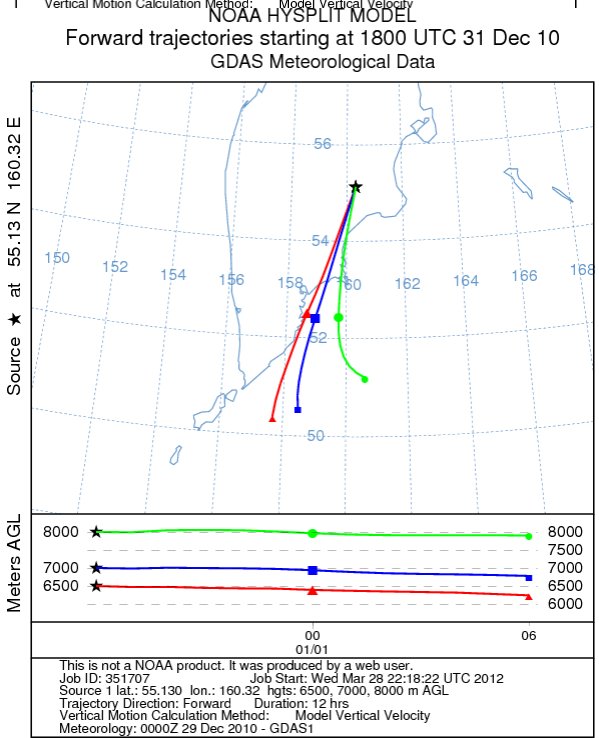



NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1800 UTC 31 Dec 10
GDAS Meteorological Data
Source ★ at 55.13 N 160.32 E
154
156
158
160
162
164
166
56
54
52
Meters AGL
1500
1000
500
100
00
01/01
06
This is not a NOAA product. It was produced by a web user.
Job ID: 36710 Job Start: Wed Mar 28 14:24:03 UTC 2012
Source 1 lat.: 55.130 lon.: 160.32 hgts: 100, 500, 1000 m AGL
Trajectory Direction: Forward Duration: 12 hrs
Vertical Motion Calculation Method: Model Vertical Velocity
Meteorology: 0000Z 29 Dec 2010 - GDAS1

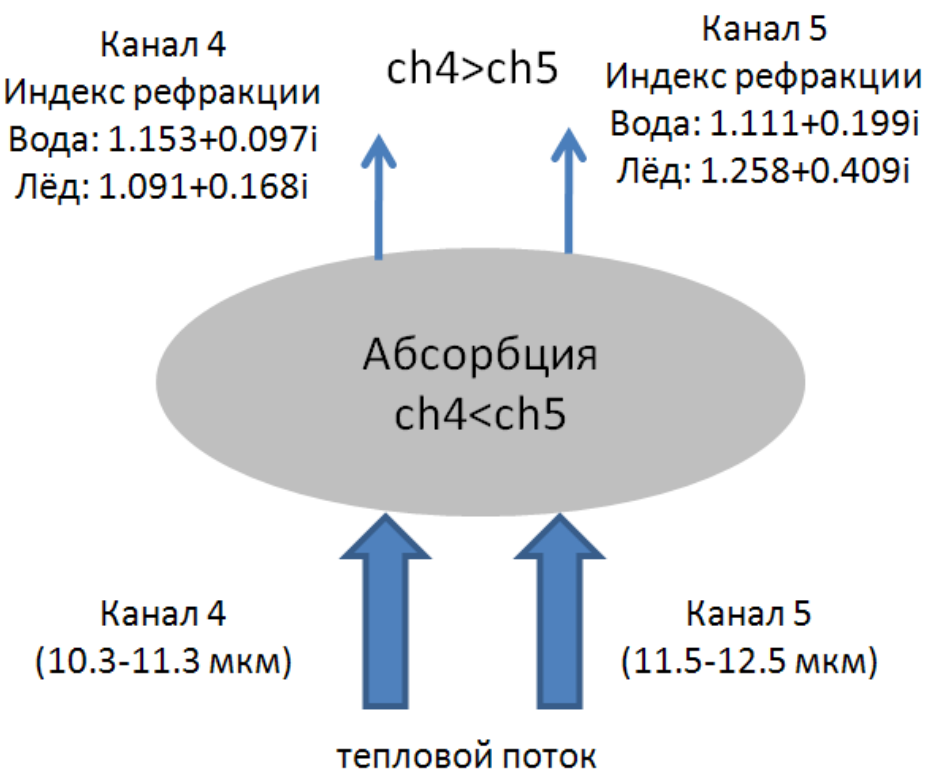

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1800 UTC 31 Dec 10
GDAS Meteorological Data
Source ★ at 55.13 N 160.32 E
154
156
158
160
162
164
56
54
52
Meters AGL
3500
2500
1500
3000
2500
2000
1500
1000
00
01/01
06
This is not a NOAA product. It was produced by a web user.
Job ID: 33717 Job Start: Wed Mar 28 14:25:13 UTC 2012
Source 1 lat.: 55.130 lon.: 160.32 hgts: 1500, 2500, 3500 m AGL
Trajectory Direction: Forward Duration: 12 hrs
Vertical Motion Calculation Method: Model Vertical Velocity
Meteorology: 0000Z 29 Dec 2010 - GDAS1


150 км
Image © 2012 TerraMetrics
© 2012 Google
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO
© 2012 GIS Innovatsia

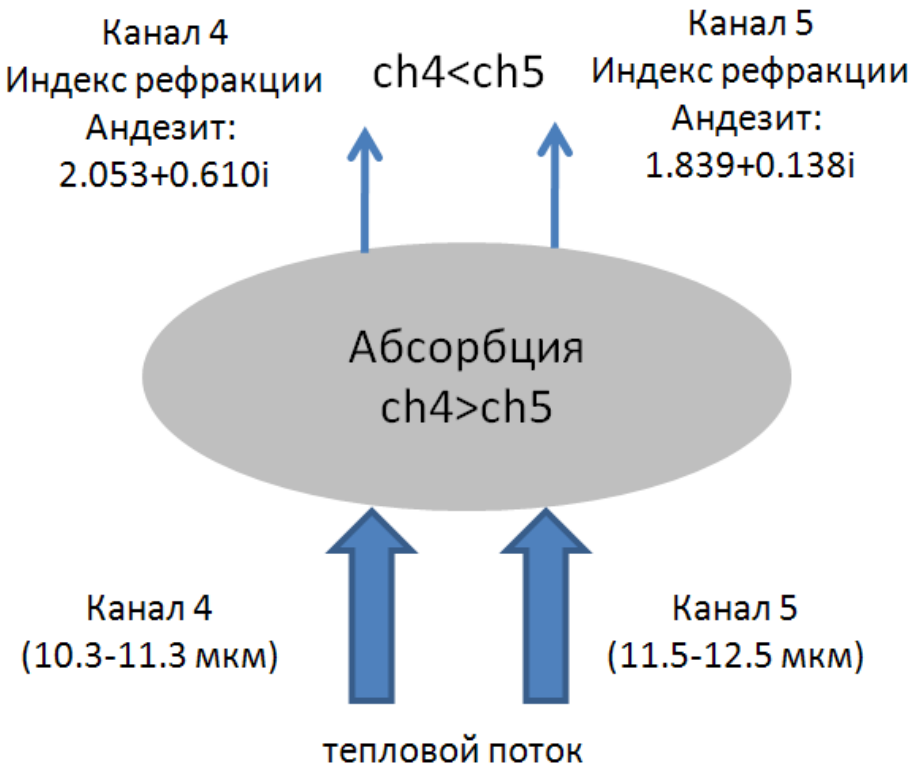

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1800 UTC 31 Dec 10
GDAS Meteorological Data
Source ★ at 55.13 N 160.32 E
Meters AGL
6000
5000
4000
5500
5000
4500
4000
3500
00
06
01/01
This is not a NOAA product. It was produced by a web user.
Job ID: 381697 Job Start: Wed Mar 28 22:12:39 UTC 2012
Source 1 lat.: 55.130 lon.: 160.32 hgts: 4000, 5000, 6000 m AGL
Trajectory Direction: Forward Duration: 12 hrs
Vertical Motion Calculation Method: Model Vertical Velocity

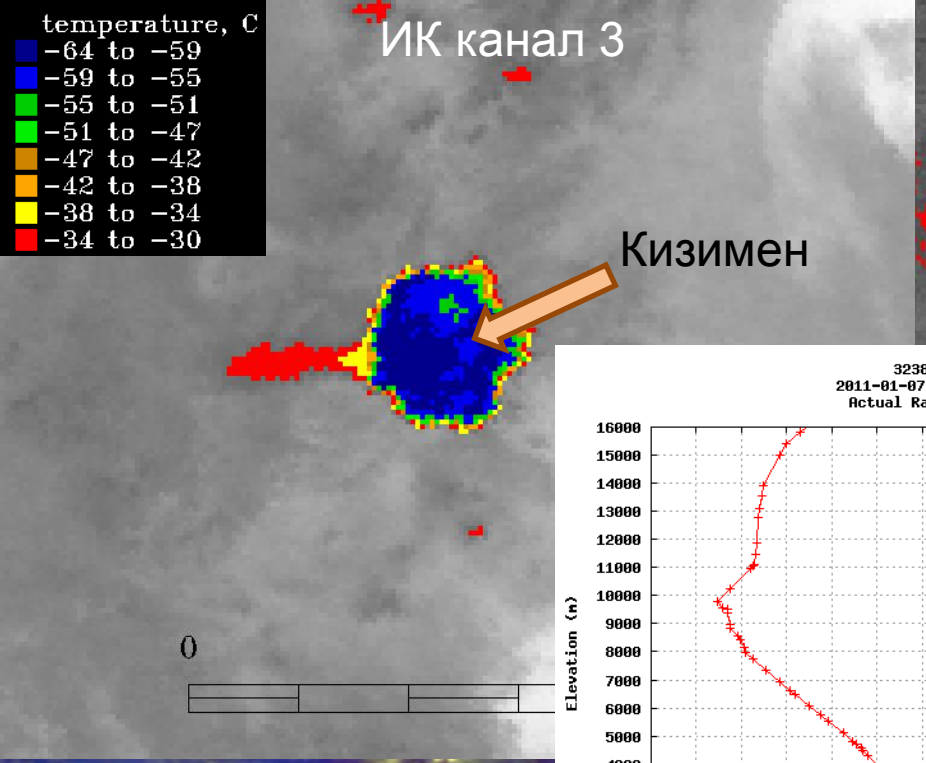

NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1800 UTC 31 Dec 10
GDAS Meteorological Data
Source ★ at 55.13 N 160.32 E
Meters AGL
8000
7000
6500
8000
7500
7000
6500
6000
00
06
01/01
This is not a NOAA product. It was produced by a web user.
Job ID: 351707 Job Start: Wed Mar 28 22:18:22 UTC 2012
Source 1 lat.: 55.130 lon.: 160.32 hgts: 6500, 7000, 8000 m AGL
Trajectory Direction: Forward Duration: 12 hrs
Vertical Motion Calculation Method: Model Vertical Velocity
Meteorology: 0000Z 29 Dec 2010 - GDAS1

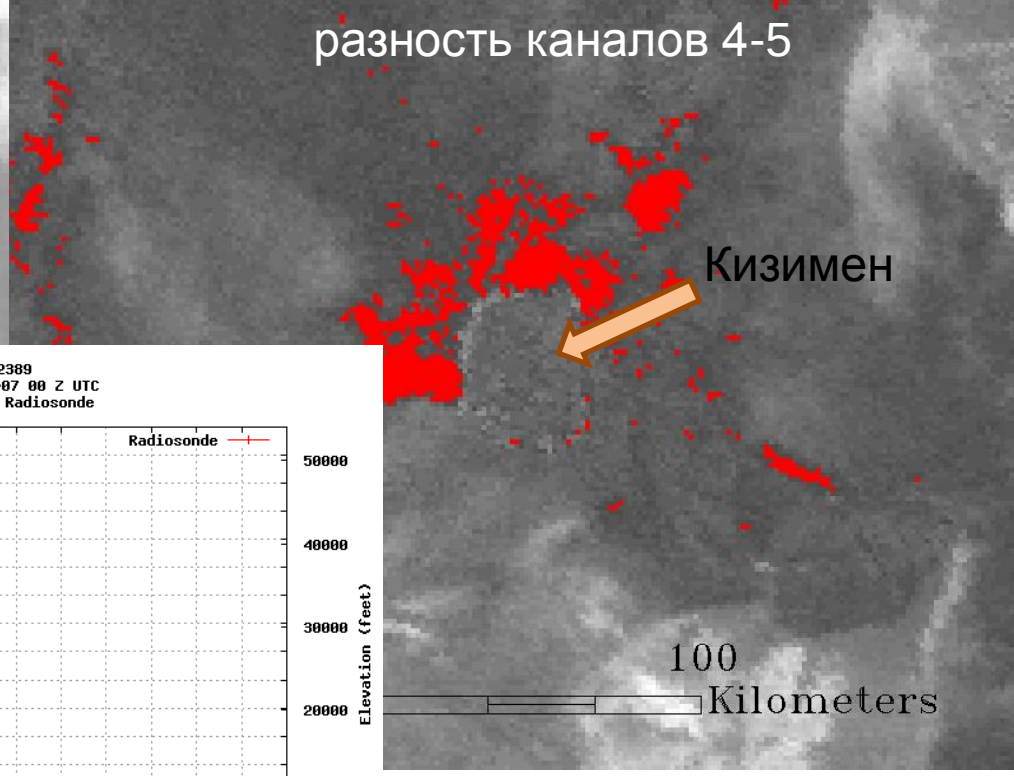
Метеорологические облака
Яркостная температура
Канал 4 – канал 5 = позитив

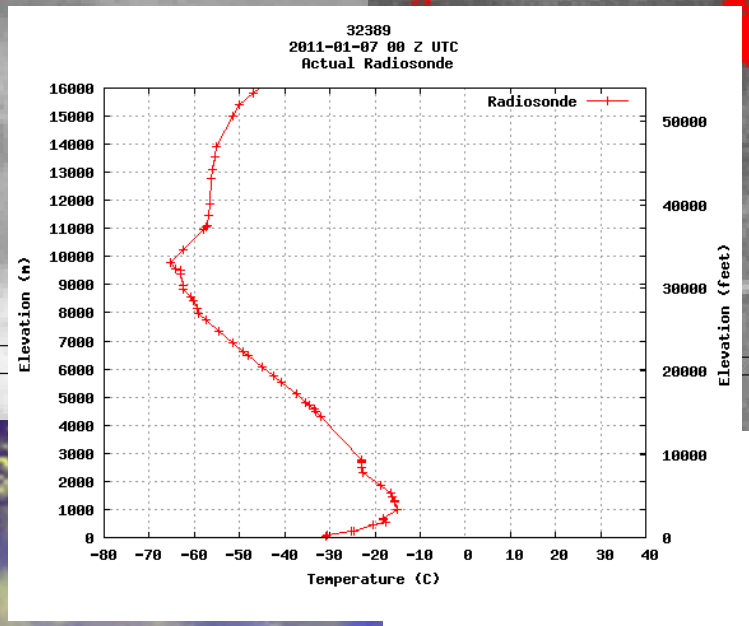


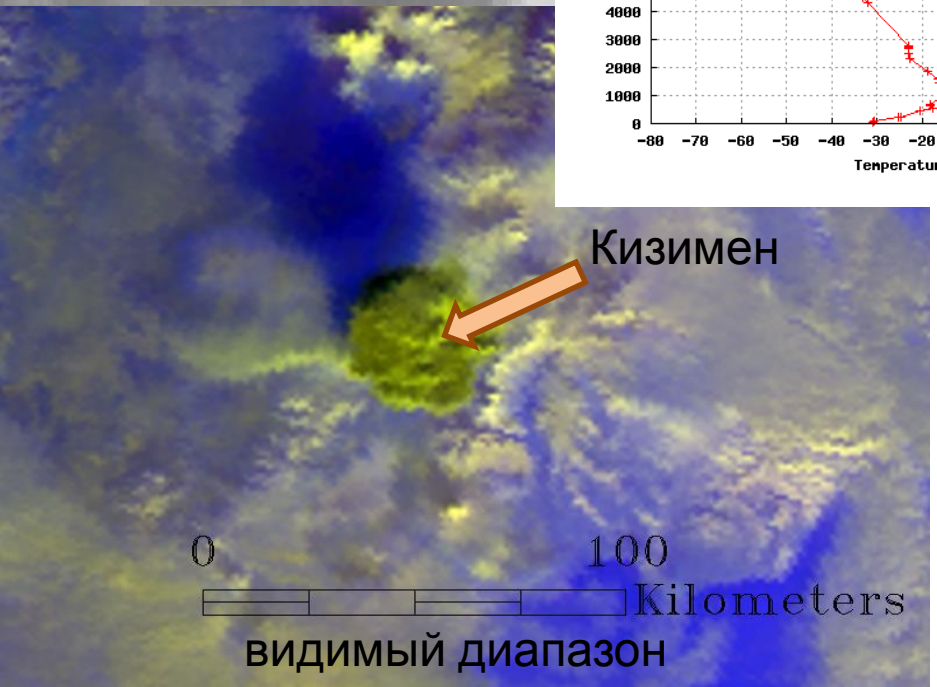
Пепловые облака
Яркостная температура
Канал 4 – канал 5 = негатив



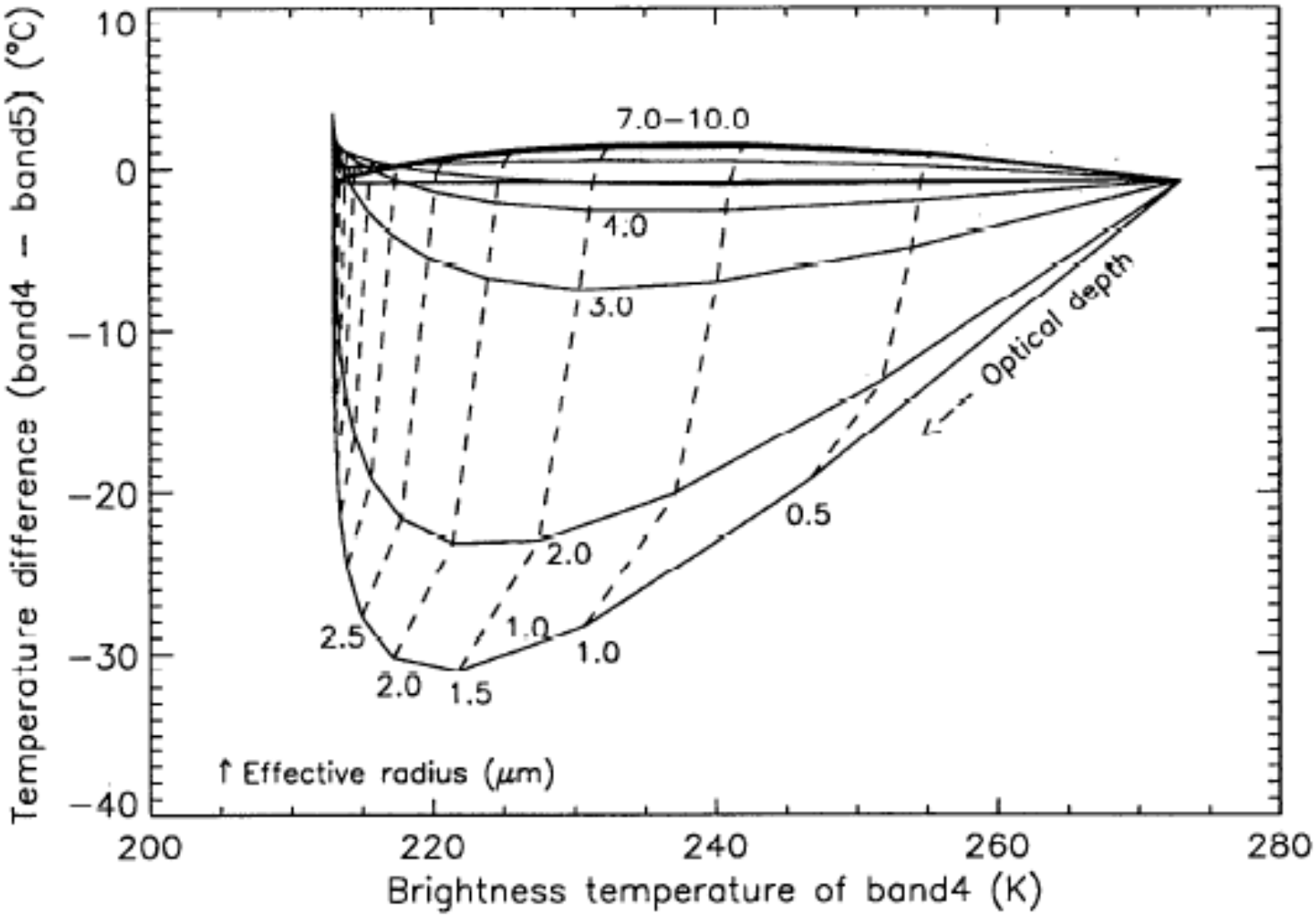




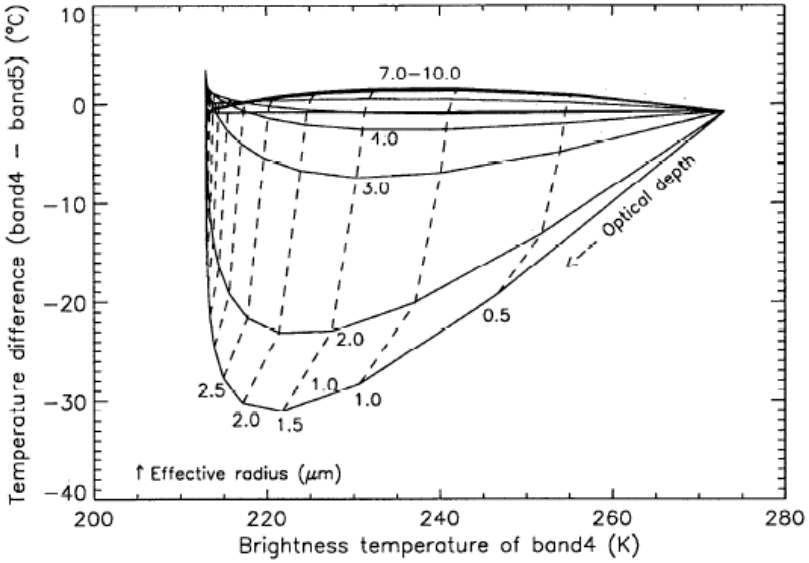


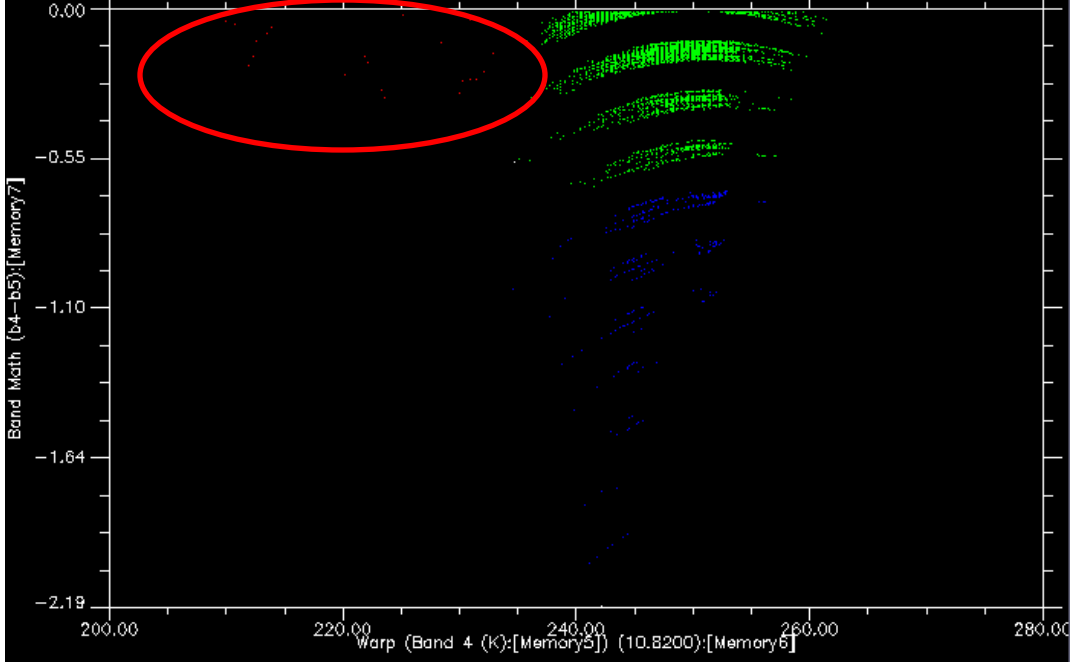


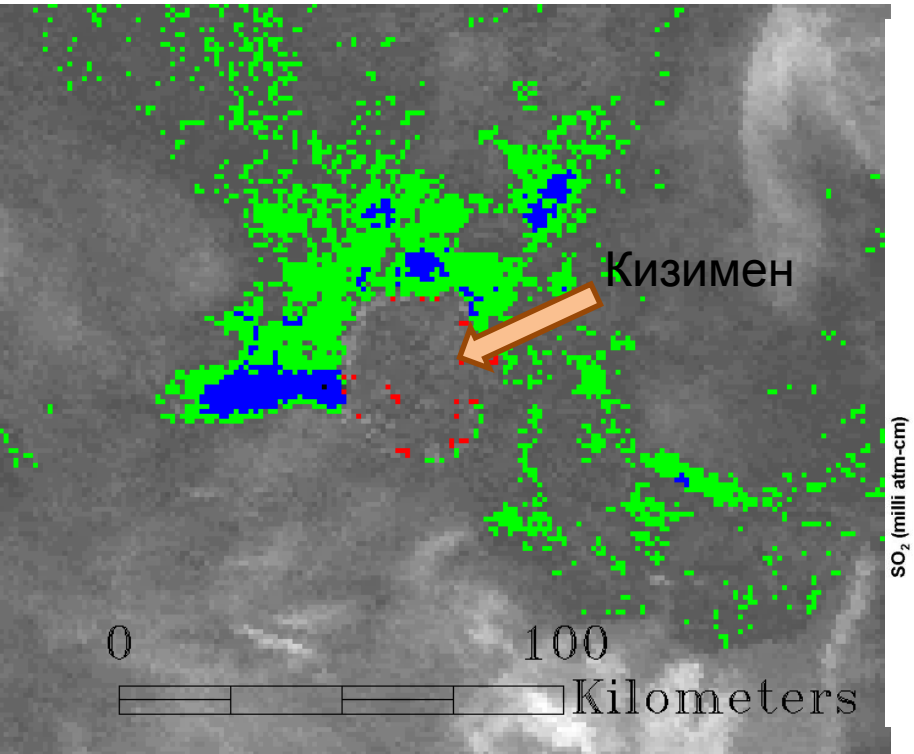
Кизимен
Эксплозивное событие в 23:59 UTC 06.01.2011
Спутниковый снимок
METOP-A AVHRR 07.01.2011 00:16 UTC

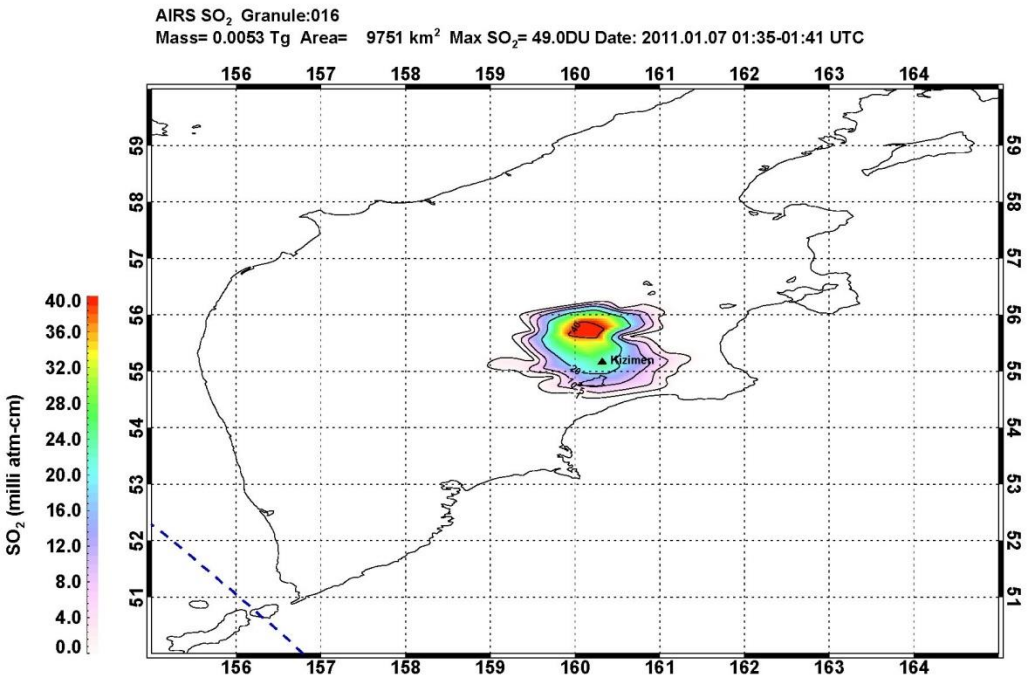


WEN AND ROSE: PARTICLE SIZES AND MASSES IN VOLCANIC CLOUDS
JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 99, NO. D3, PAGES 5421–5431, MARCH 20, 1994


Temperature difference (band4 − band5) (°C)
Brightness temperature of band4 (K)
7.0–10.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.5
2.5
2.0
1.5
1.0
Optical depth
↑ Effective radius (μm)


Band Math (b4−b5):[Memory7]
Warp (Band 4 (K):[Memory5]) (10.8200):[Memory6]


Кизимен
0
100
Kilometers


AIRS SO2 Granule:016
Mass= 0.0053 Tg Area= 9751 km2 Max SO2= 49.0DU Date: 2011.01.07 01:35-01:41 UTC
SO2 (milli atm-cm)
Kizimen

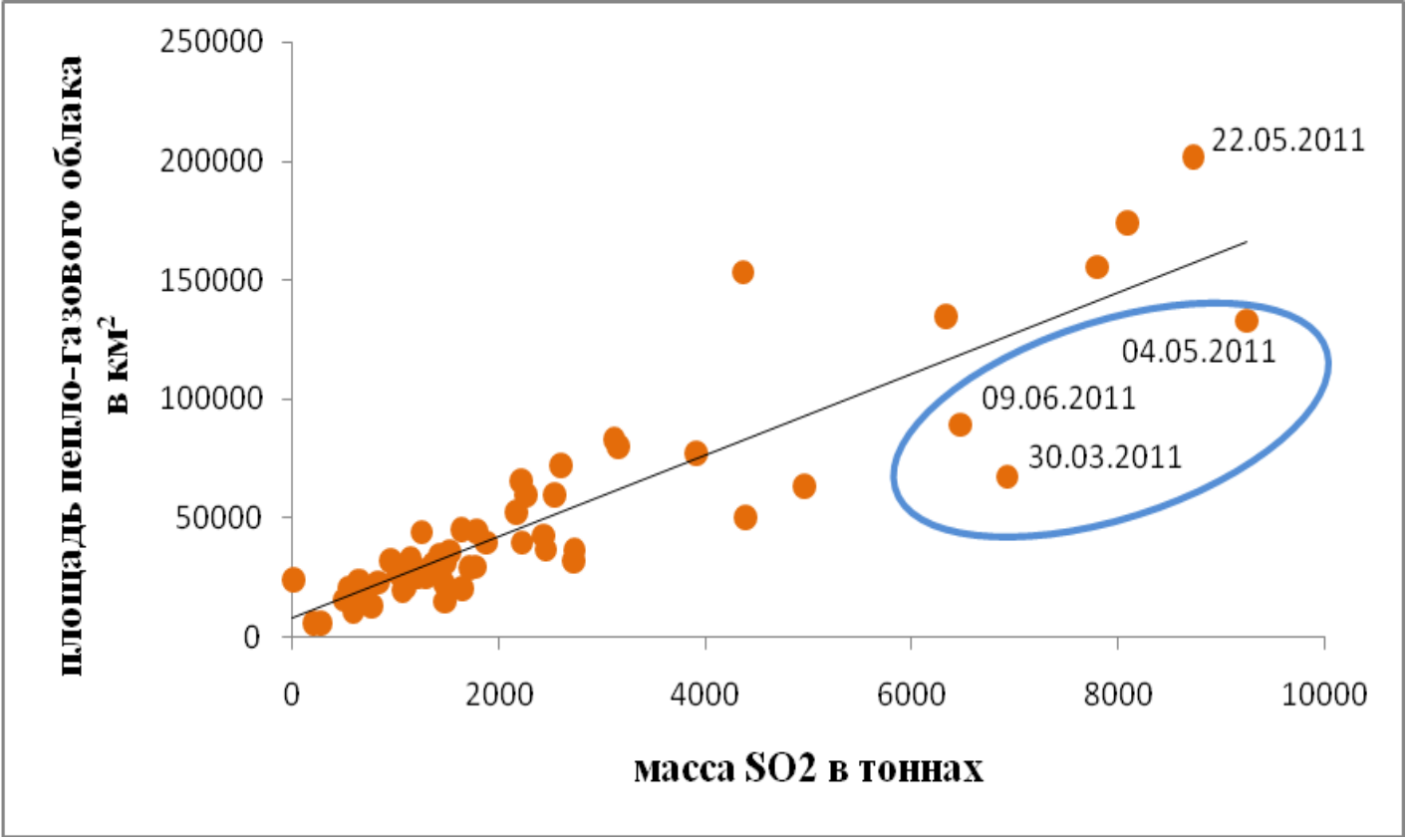
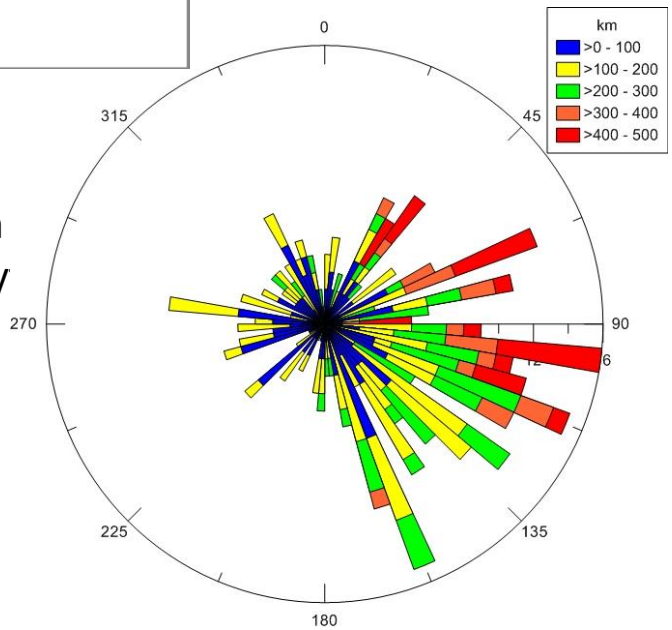
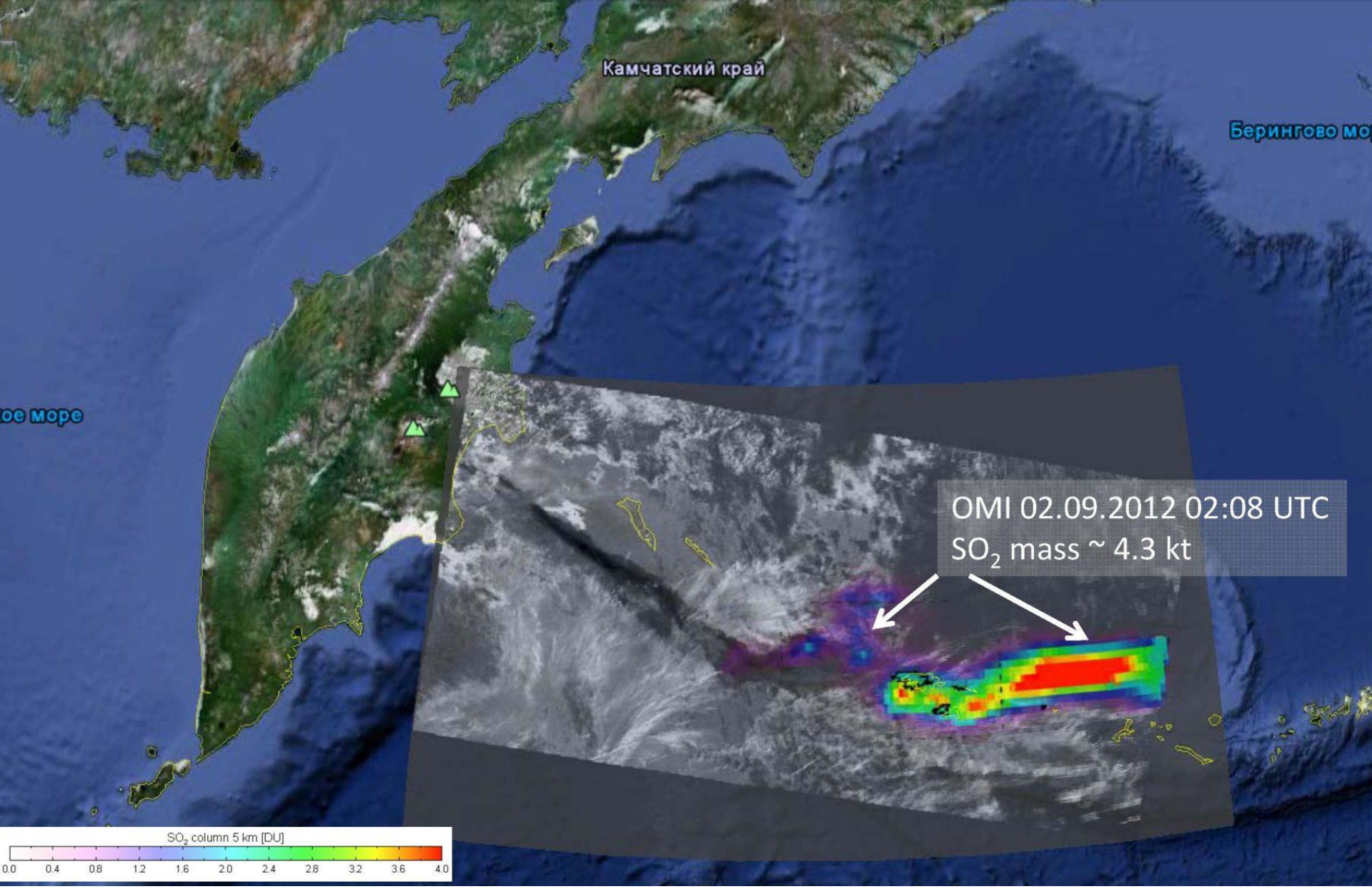


График зависимости массы диоксида серы и площади пепло-газовых шлейфов.
Выделяются несколько событий с высокой концентрацией газа (большая масса при малых площадях), которые, вероятно, могу свидетельствовать о повышенной активности вулкана

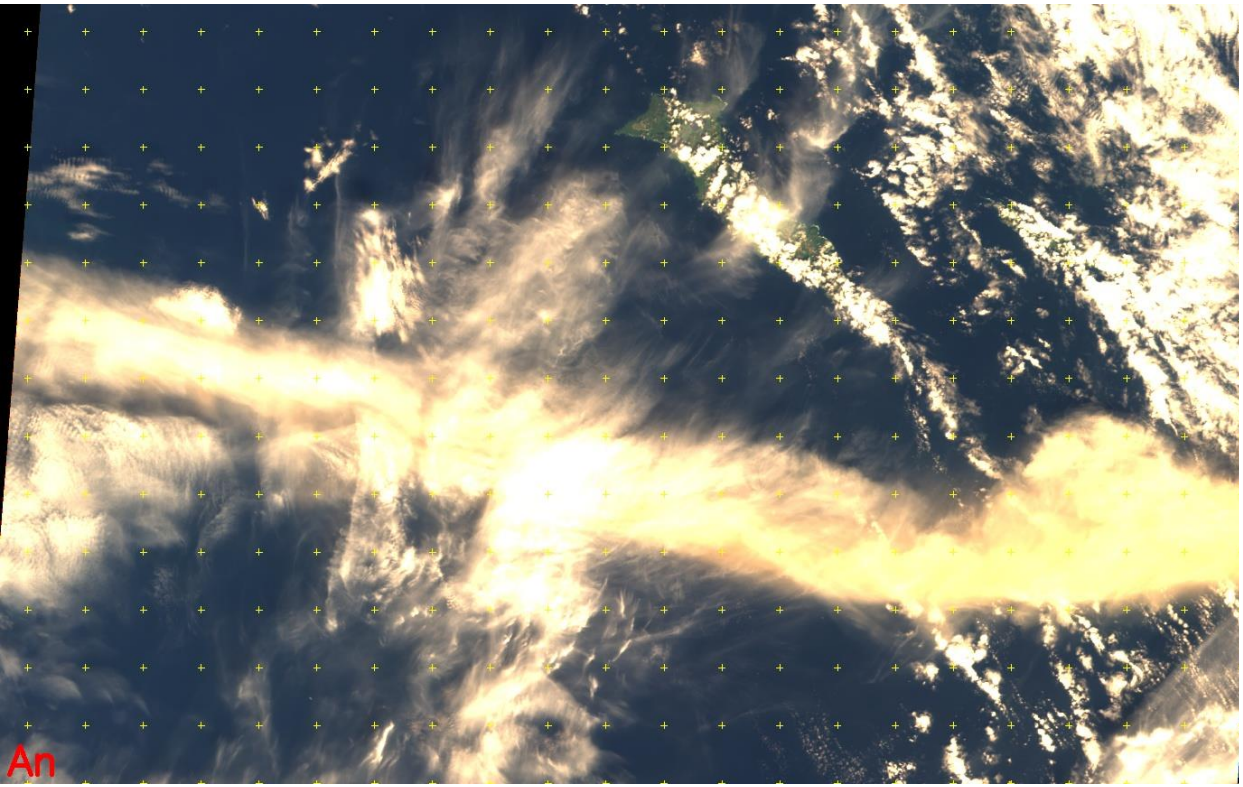


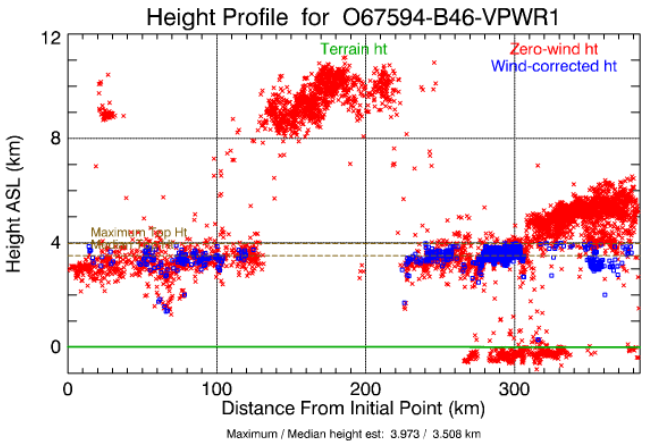
Безымянный вулкан 1.09.2012

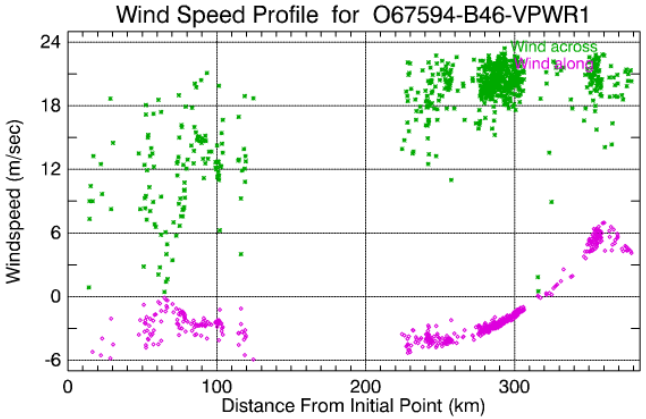


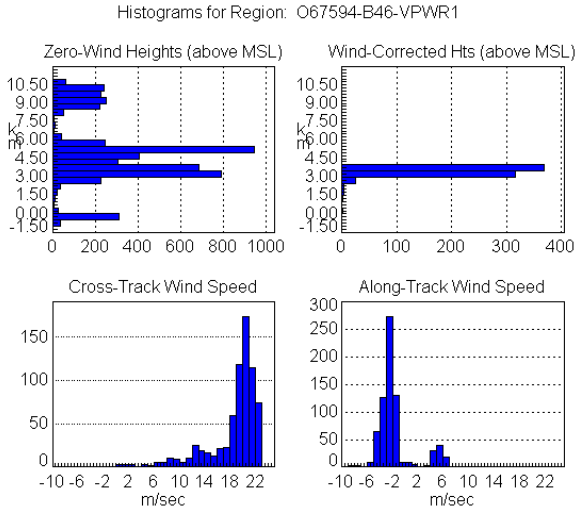
Комбинация данных MODIS и OMI

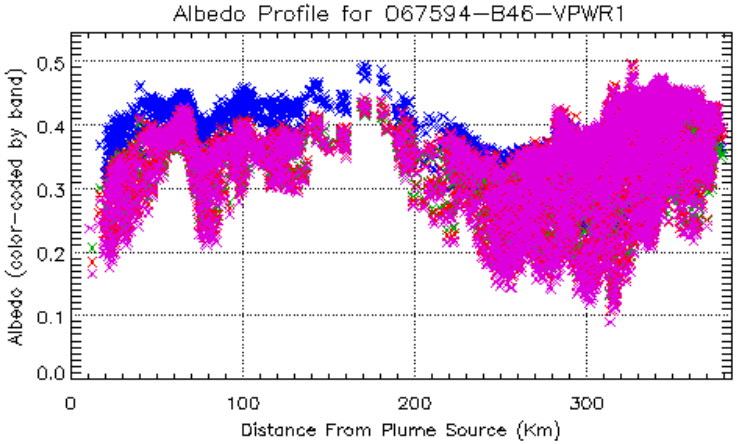
TERRA MISR 02.09.2012 00:13 UTC

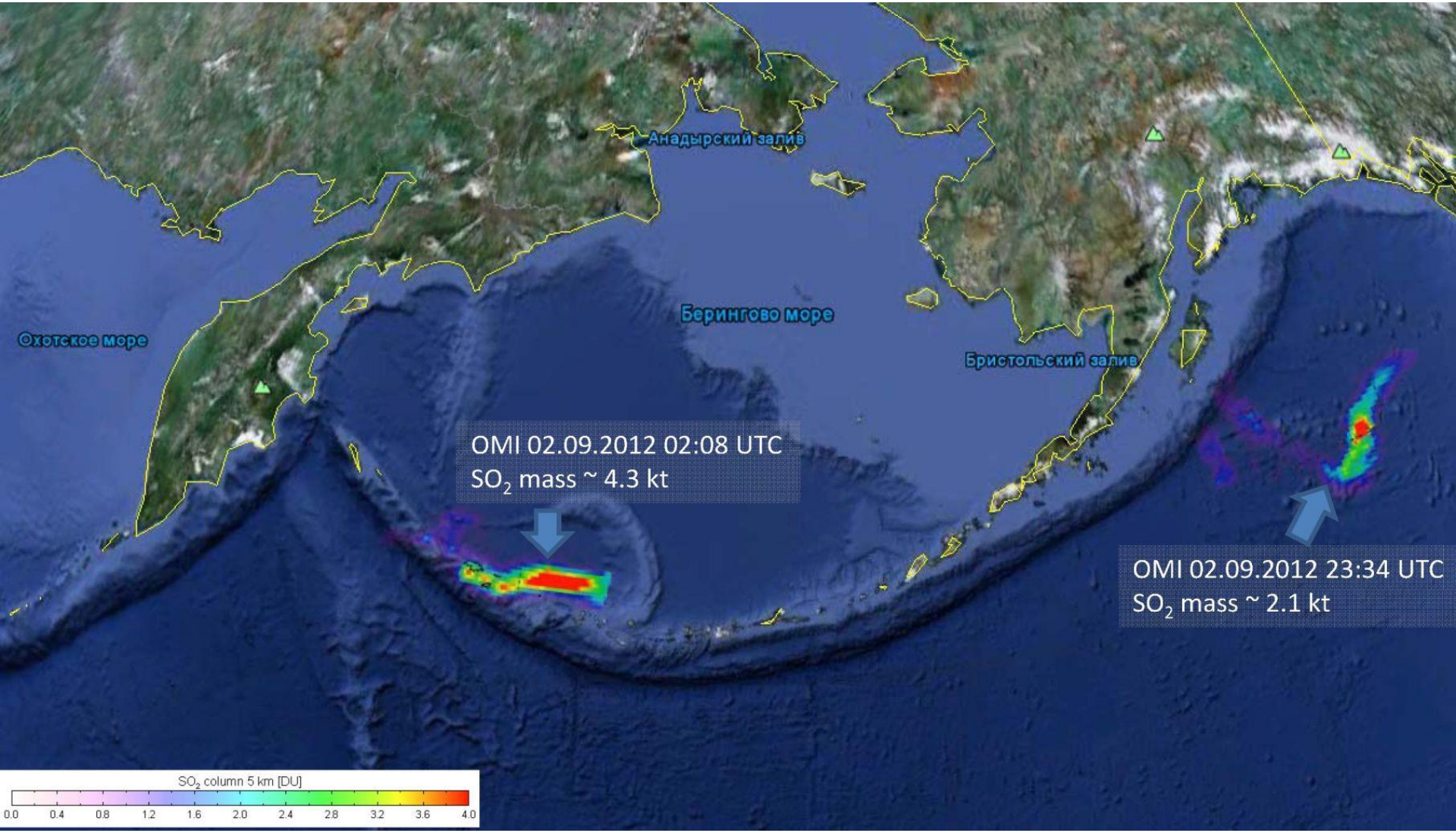






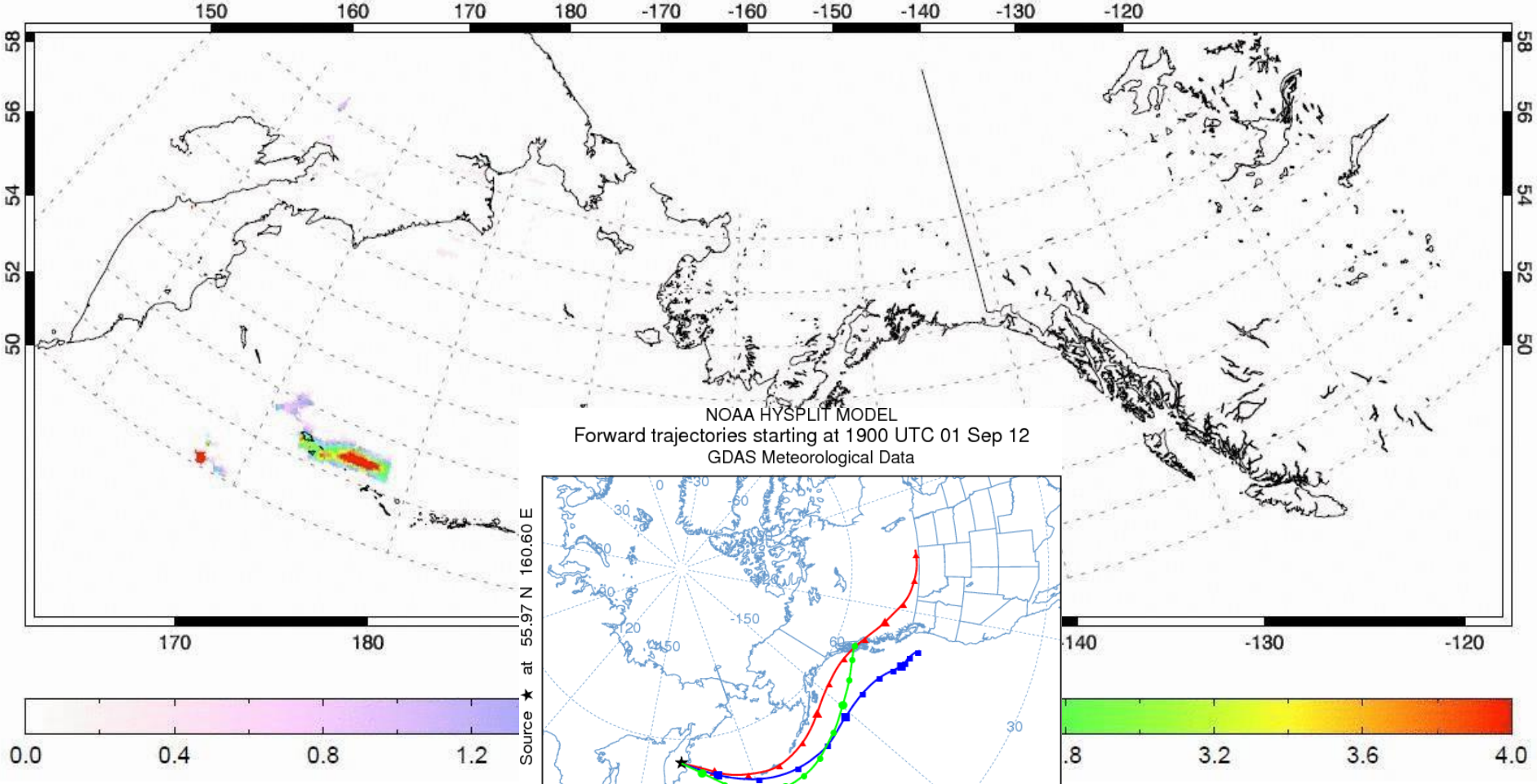




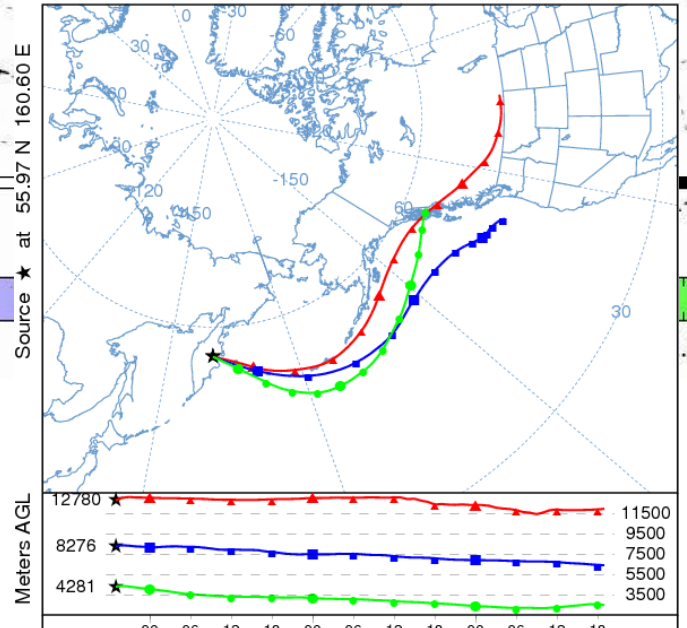

Анадырский залив
Охотское море
Берингово море
Бристольский залив
OMI 02.09.2012 02:08 UTC
SO_2 mass ~ 4.3 kt
OMI 02.09.2012 23:34 UTC
SO_2 mass ~ 2.1 kt
SO_2 column 5 km [DU]
0.0 0.4 0.8 1.2 1.6 2.0 2.4 2.8 3.2 3.6 4.0

Aura/OMI - 09/02/2012 02:08-02:12 UT - Orbit 43262

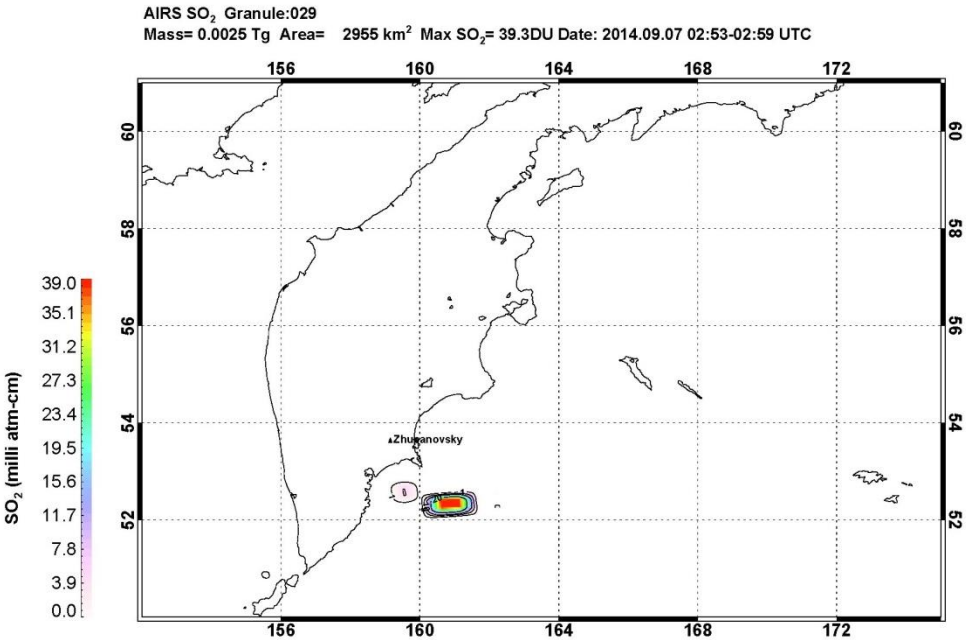
data processing IVS, D.Melnikov

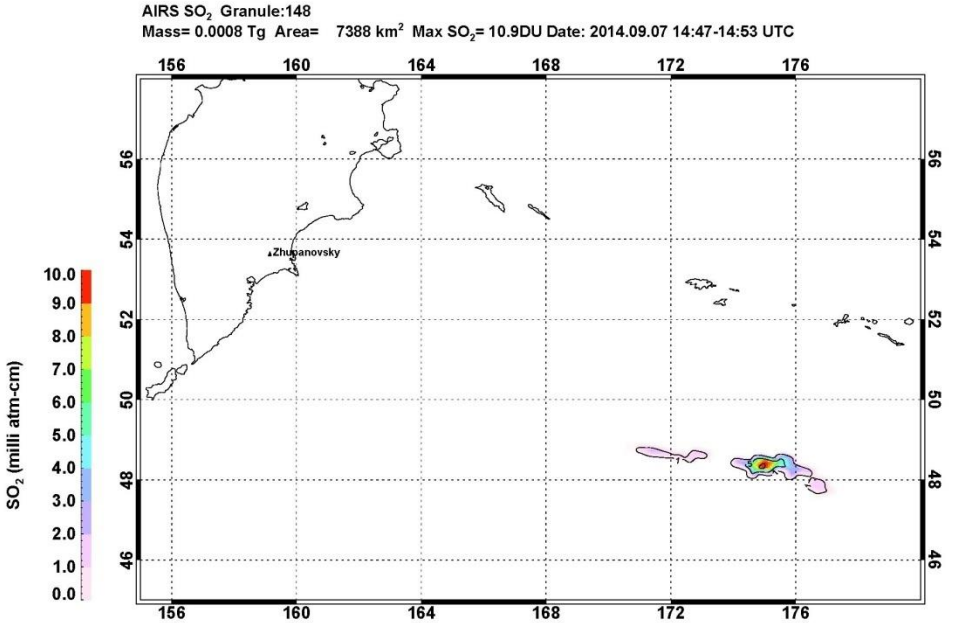


NOAA HYSPLIT MODEL
Forward trajectories starting at 1900 UTC 01 Sep 12
GDAS Meteorological Data

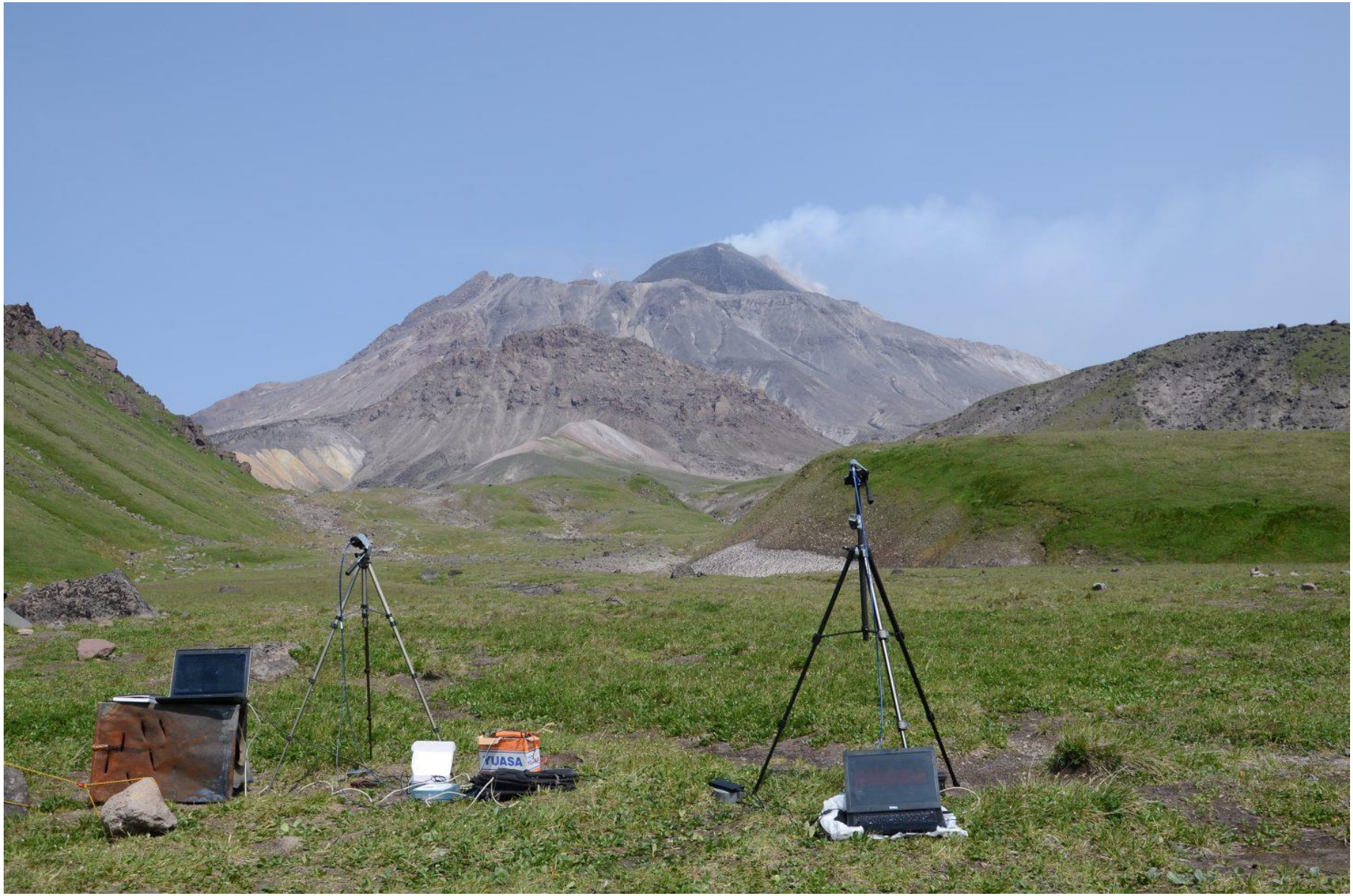


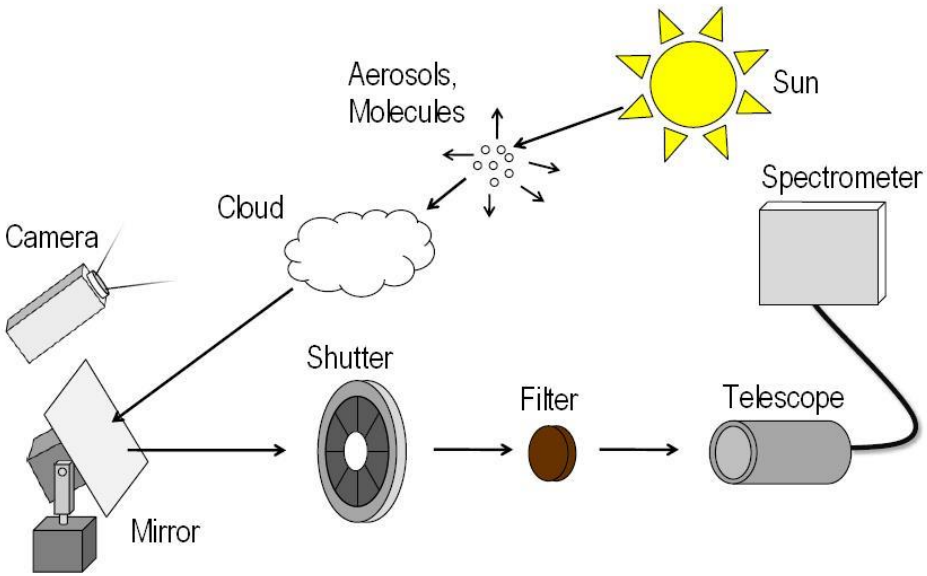
This is not a NOAA product. It was produced by a web user.
Job ID: 373243 Job Start: Tue Nov 13 20:51:28 UTC 2012
Source 1 lat.: 55.97 lon.: 160.6 hgts: 13500, 9000, 5000 m AMSL
Trajectory Direction: Forward Duration: 72 hrs
Vertical Motion Calculation Method: Model Vertical Velocity
Meteorology: 0000Z 01 Sep 2012 - GDAS1

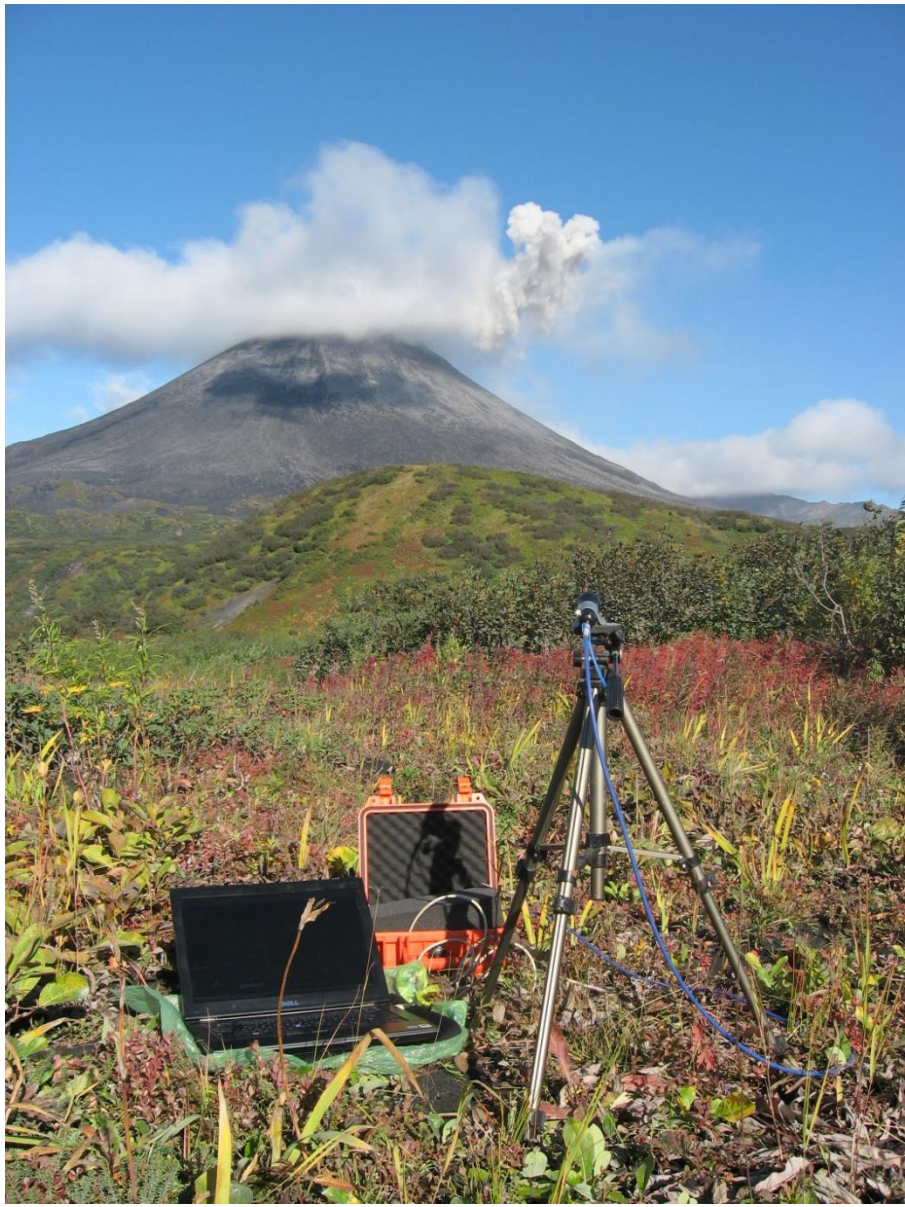

AIRS SO_2 Granule:029
Mass= 0.0025 Tg Area= 2955 km^2 Max SO_2= 39.3DU Date: 2014.09.07 02:53-02:59 UTC
SO_2 (milli atm-cm)
39.0
35.1
31.2
27.3
23.4
19.5
15.6
11.7
7.8
3.9
0.0
Zhupanovsky
156
160
164
168
172
60
58
56
54
52

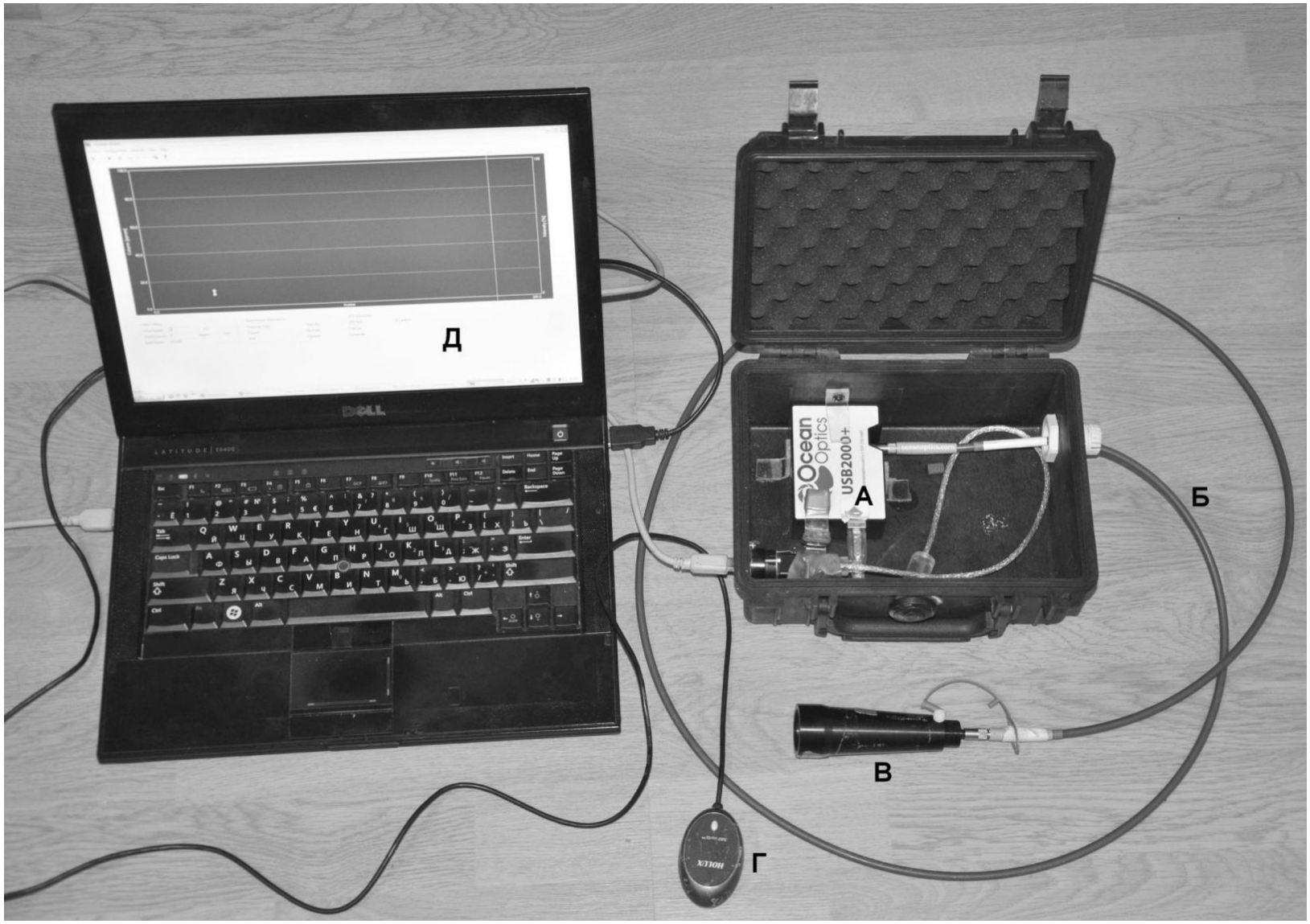

AIRS SO_2 Granule:148
Mass= 0.0008 Tg Area= 7388 km^2 Max SO_2= 10.9DU Date: 2014.09.07 14:47-14:53 UTC
SO_2 (milli atm-cm)
10.0
9.0
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.0
Zhupanovsky
156
160
164
168
172
176
56
54
52
50
48
46

Наземные дистанционные измерения SO_2

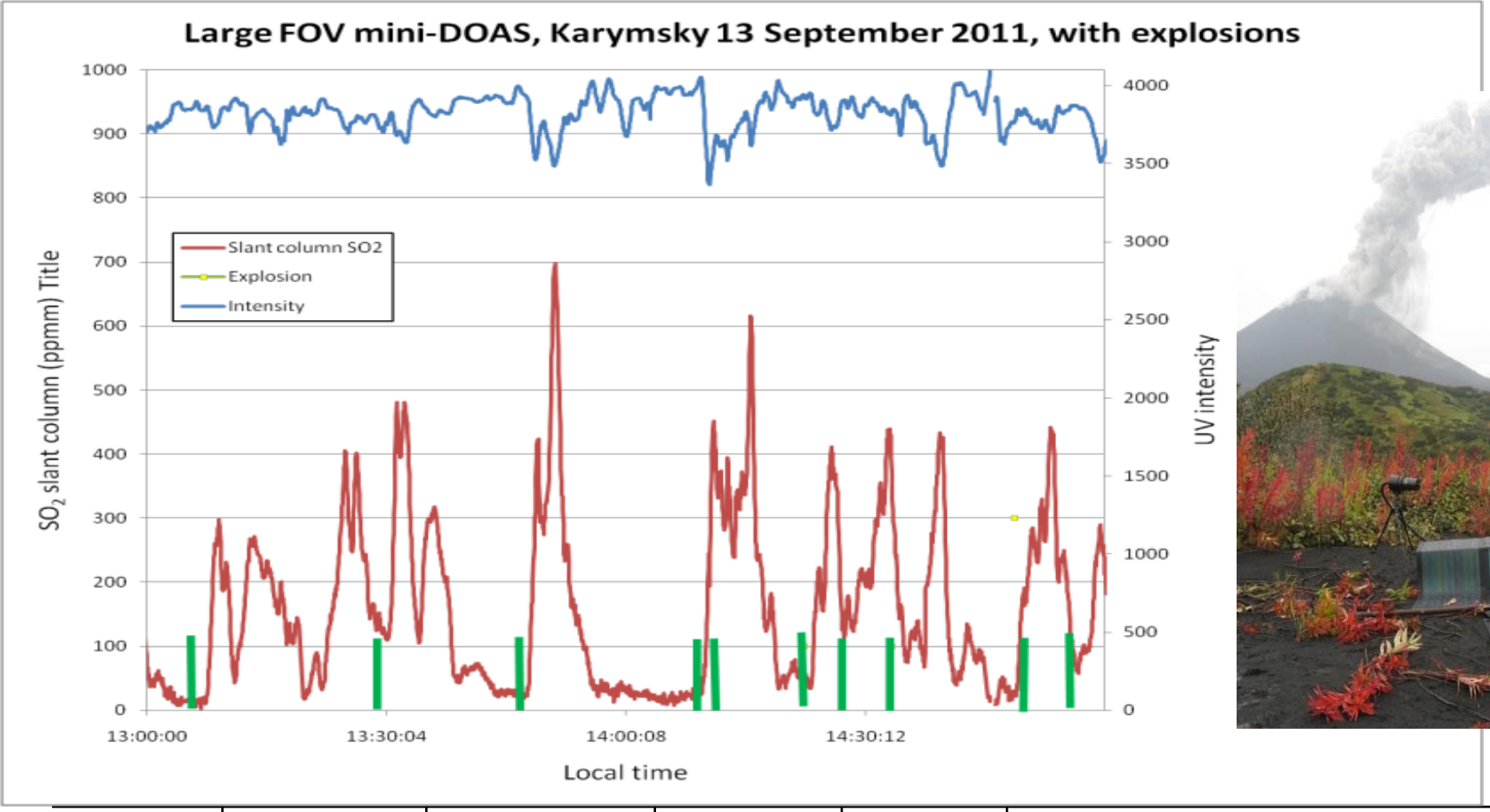



Aerosols,
Molecules
Sun
Spectrometer
Cloud
Camera
Shutter
Filter
Telescope
Mirror

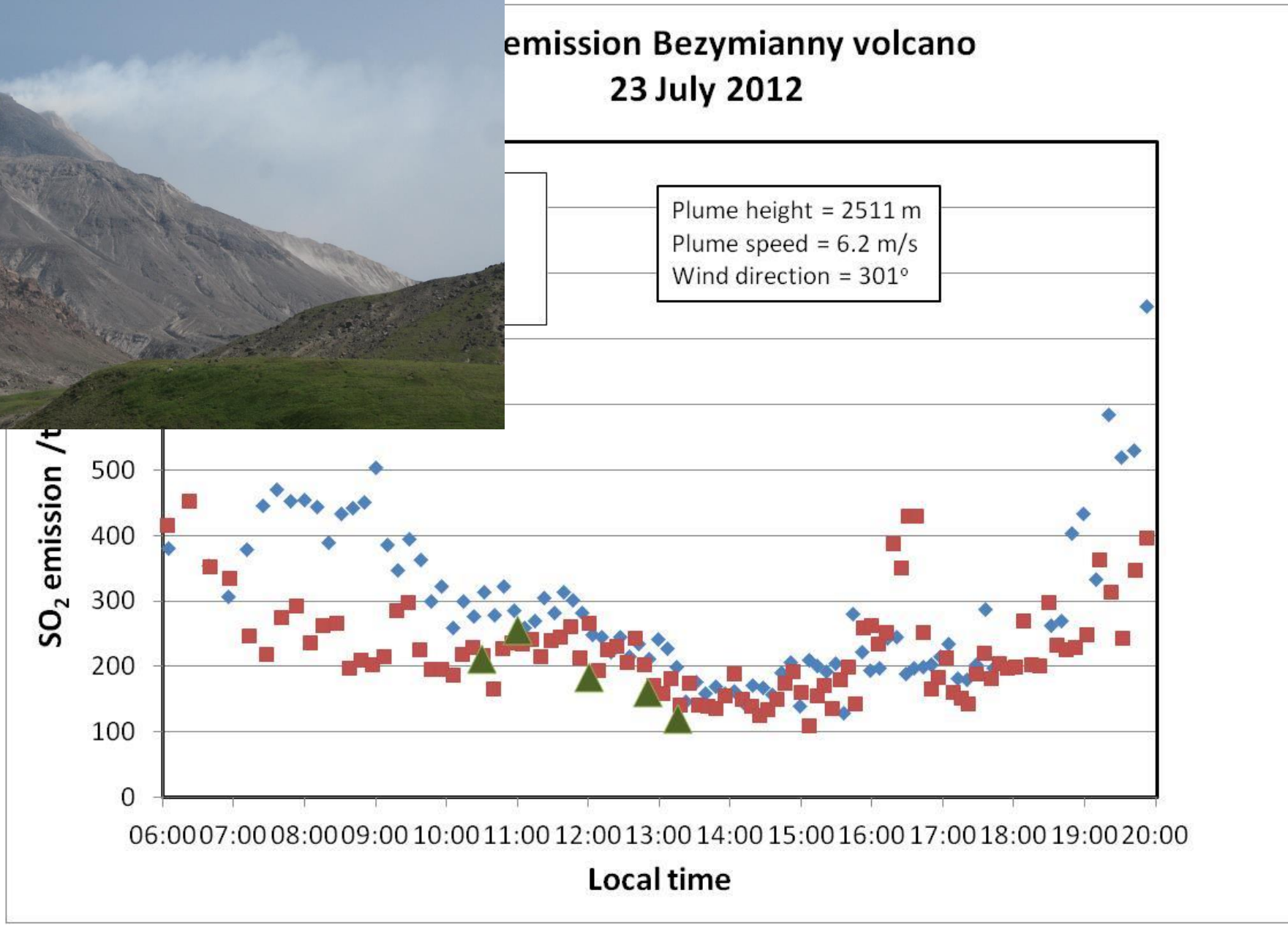




Принципиальная компоновка мобильной дистанционной системы измерения и анализа диоксида серы. А – спектрометр USB2000+, Б – оптоволоконный кабель, В – коллиматор, Г – GPS приёмник, Д – ноутбук с установленным программным обеспечением анализа диоксида серы.

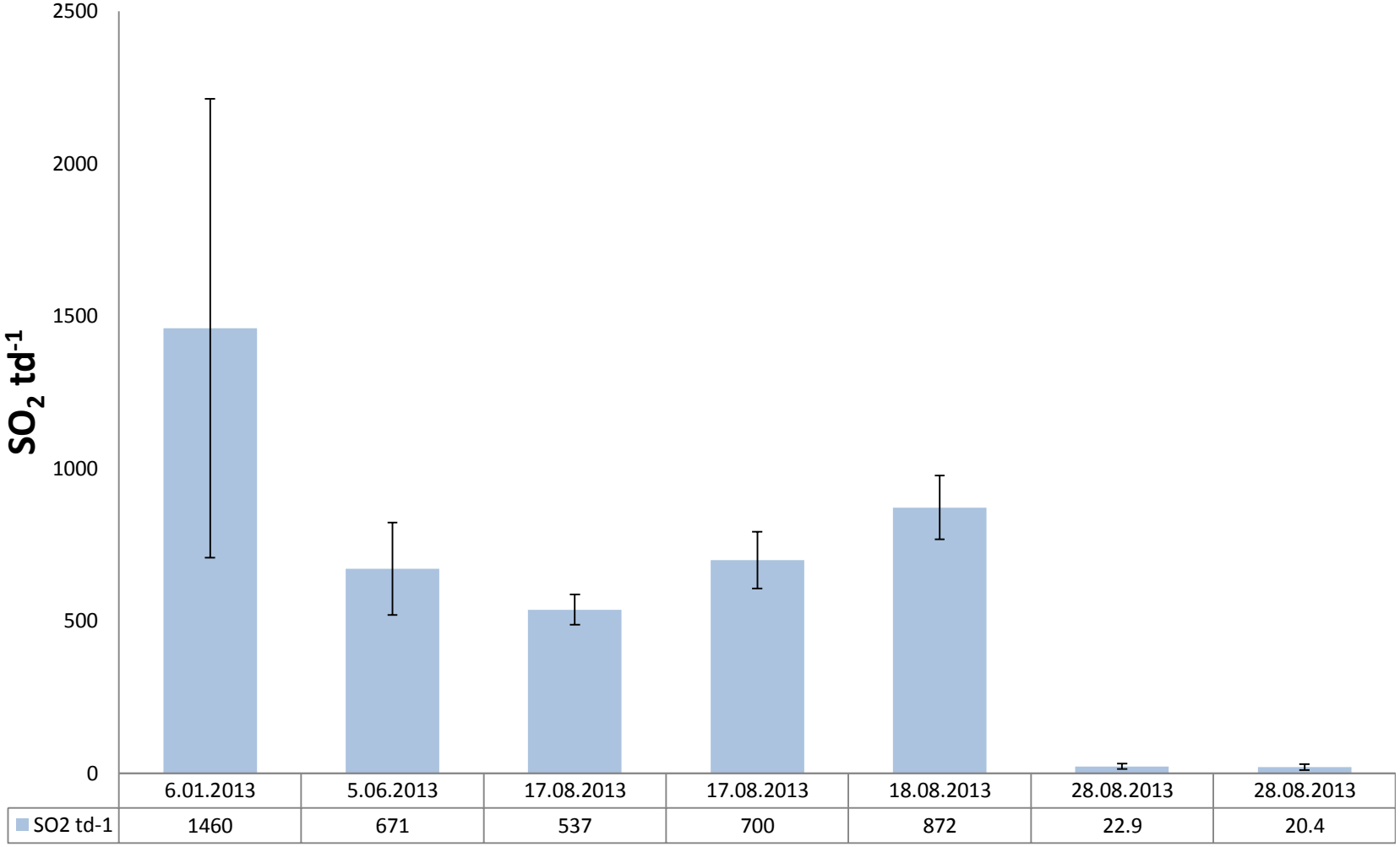


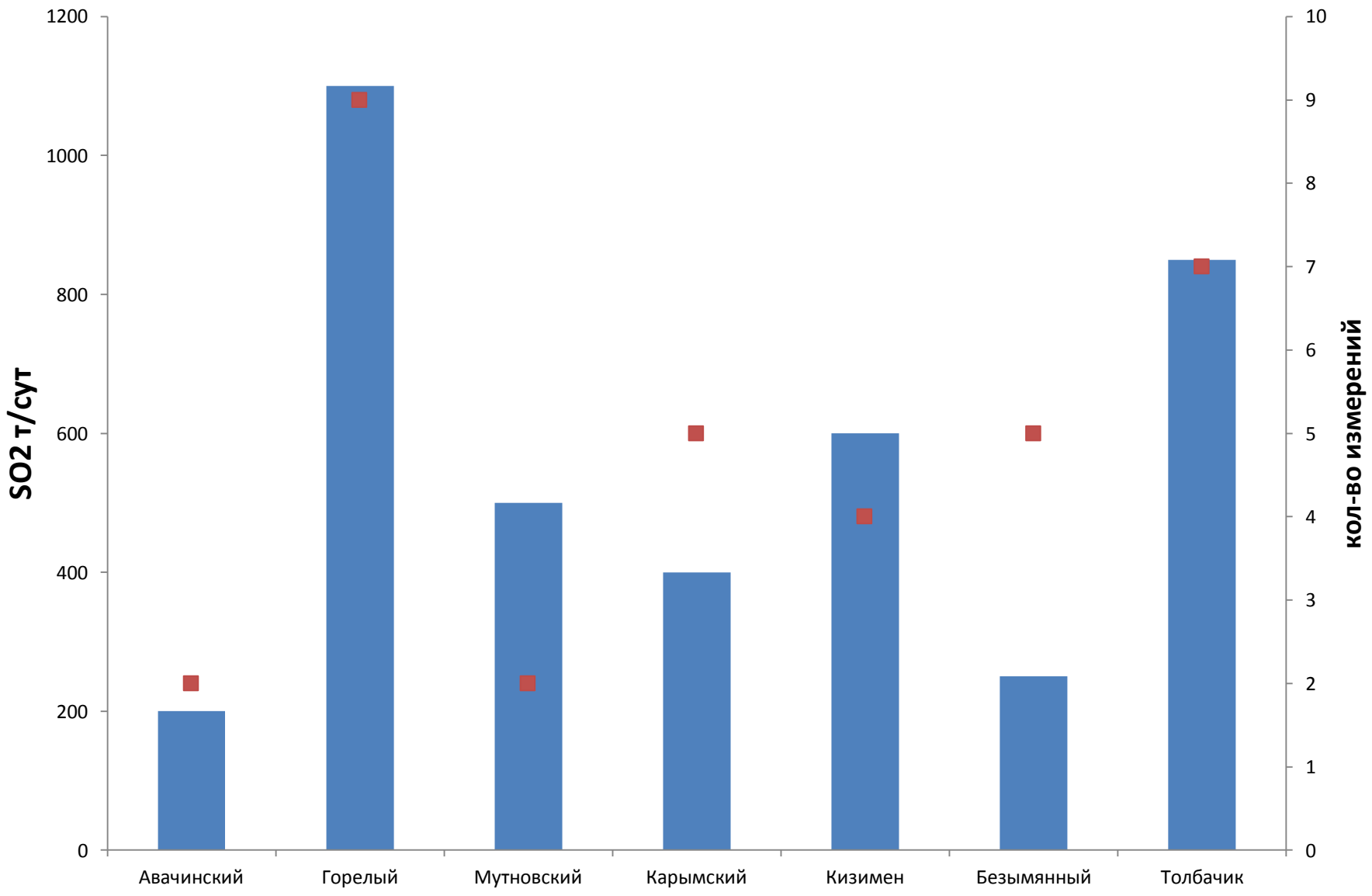
	Количество измерений	Направление плюма	Скорость плюма ms^{-1}	Высота плюма, м	Поток SO_2 / td^{-1}		
					диапазон	среднее	Ср. квадратичное
Станция А	189	328 ± 35	6	1375 ± 340 (33)	28 – 3145	**480**	429
Станция В	243	333 ± 21	6	1375 ± 340 (33)	72 -1159	**295**	202
А + В	432	331 ± 28	6	1375 ± 340 (33)	28 – 3145	**376**	334


emission Bezymianny volcano
23 July 2012
Plume height = 2511 m
Plume speed = 6.2 m/s
Wind direction = 301°
SO2 emission /t
500
400
300
200
100
0
06:00
07:00
08:00
09:00
10:00
11:00
12:00
13:00
14:00
15:00
16:00
17:00
18:00
19:00
20:00
Local time

Толбачик 2013

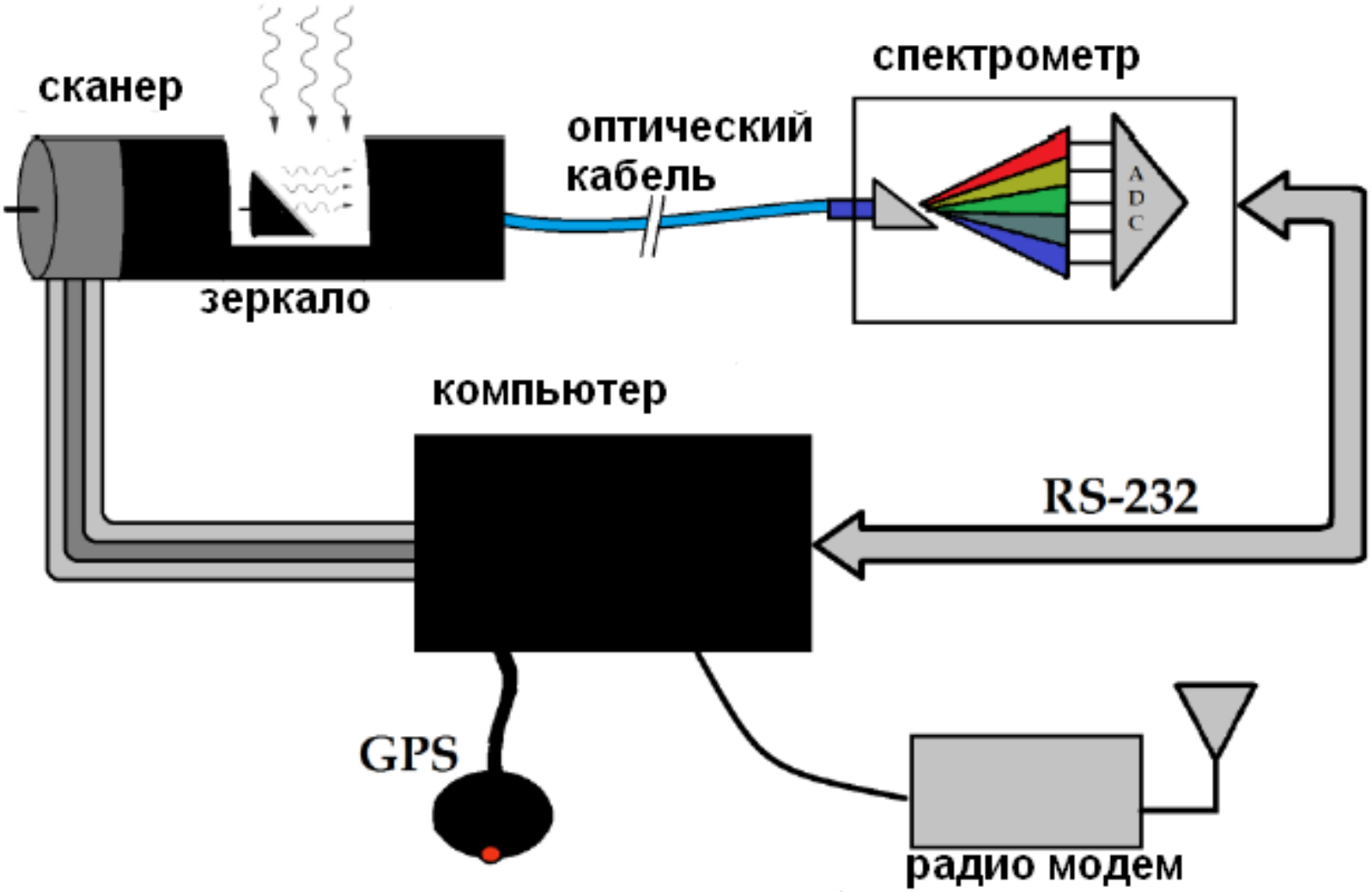
Толбачик

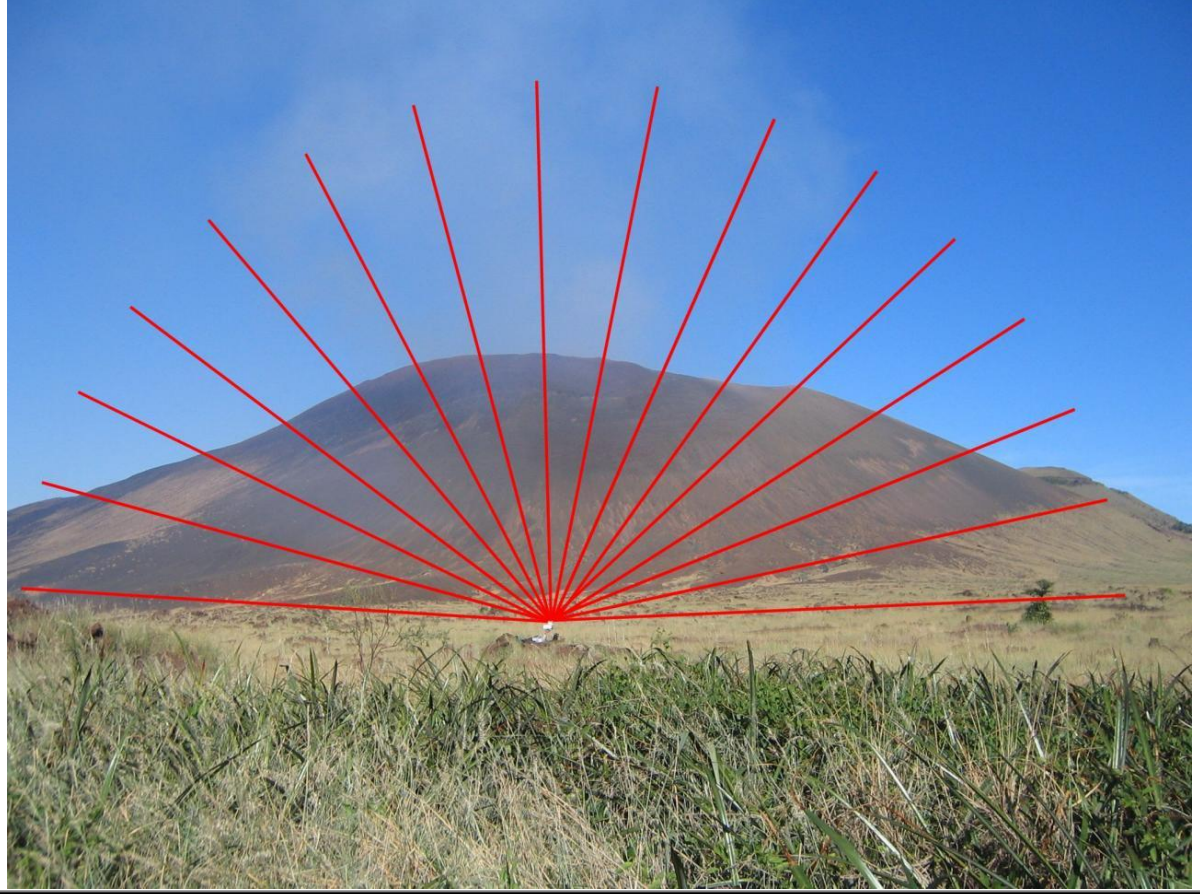

2500
2000
1500
1000
500
0
SO_2 td^{-1}
6.01.2013
5.06.2013
17.08.2013
17.08.2013
18.08.2013
28.08.2013
28.08.2013
SO2 td-1
1460
671
537
700
872
22.9
20.4

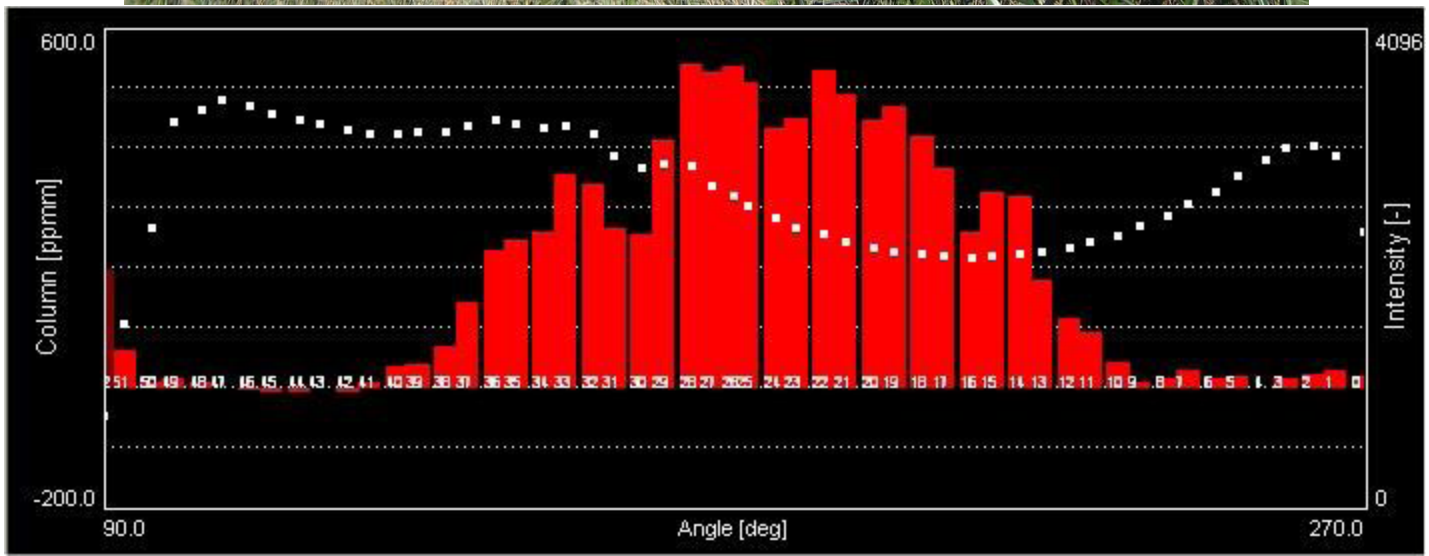

SO2 т/сут
кол-во измерений
1200
1000
800
600
400
200
0
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
0
Авачинский
Горелый
Мутновский
Карымский
Кизимен
Безымянный
Толбачик

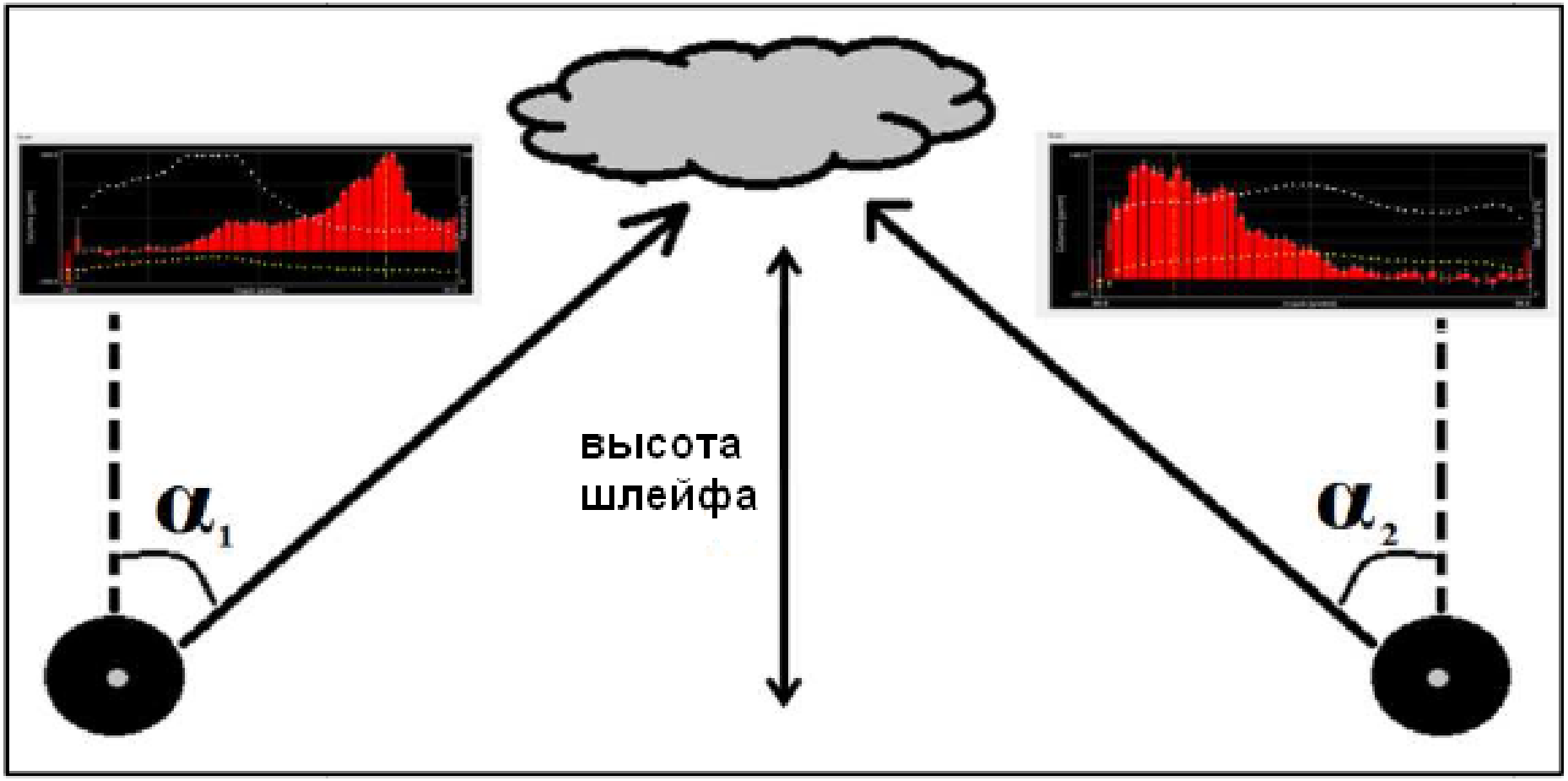
Автоматическая станция измерения SO2

Принципиальная схема автоматической станции






600.0
-200.0
Column [pprmm]
4096
0
Intensity [-]
90.0
Angle [deg]
270.0



Высота газового шлейфа на основе углового направления сканирования на центр шлейфа

Анализ типа вулканической активности

- 1) текущее состояние вулкана – присутствует дегазация диоксида серы на вулкане или нет.

- 2) стадию роста вулканической активности. Для большинства вулканов рост концентраций диоксида серы будет соответствовать этапу активизации.

- 3) этап активной фазы извержения. На этой стадии возможно определение энергии эксплозивного события рассчитанной по общему объёму дегазации диоксида серы.