

Методика восстановления параметров H_2SO_4 основана на использовании оптических моделей, каждая из которых представляет собой таблицу зависимостей массового коэффициента ослабления (m_{ext}), альbedo однократного рассеяния (ω) и индикатрисы рассеяния (g) от длины волны λ для различных эффективных радиусов (r_e) аэрозольных частиц. Построение оптических моделей осуществлялось с помощью расчетов Ми для широкого диапазона r_e аэрозольных компонентов вулканического облака. В таблице 1 представлен пример оптических моделей для однокомпонентных аэрозолей.

Таблица 1. Оптические параметры аэрозольных компонентов

λ , мкм	Андезит $r_e = 2$ мкм, $\rho = 2.6$ г/см ³			H_2SO_4 $r_e = 0.6$ мкм, $\rho = 1.84$ г/см ³			Капли воды $r_e = 10$ мкм, $\rho = 1.0$ г/см ³			Крист. льда $r_e = 30$ мкм, $\rho = 0.917$ г/см ³		
	m_{ext}	ω	g	m_{ext}	ω	g	m_{ext}	ω	g	m_{ext}	ω	g
8.0	57	0.13	0.74	420	0.06	0.22	218	0.76	0.90	63	0.54	0.94
9.0	281	0.3	0.48	374	0.13	0.22	201	0.74	0.91	64	0.56	0.93
10.0	307	0.33	0.44	225	0.2	0.24	159	0.67	0.92	64	0.57	0.95
11.0	248	0.47	0.49	211	0.11	0.19	115	0.43	0.93	57	0.48	0.96
12.0	163	0.64	0.53	94	0.22	0.21	124	0.36	0.91	61	0.50	0.93
13.0	116	0.65	0.55	72	0.16	0.17	145	0.39	0.89	63	0.51	0.91
$m_{ext} - [M^3/км \cdot Г]$												

В ходе работы было построено большое количество различных оптических моделей, как для однокомпонентных аэрозолей, так и их смесей в различных пропорциях. Были получены следующие смеси: андезит и кристаллы льда; андезит и капли воды; андезит и H_2SO_4 ; H_2SO_4 и капли воды.

Зная величину параметра m_{ext} из модели и оптическую толщину аэрозоля (τ_{aer}), восстановленную по спутниковым измерениям, можно определить массовое содержание (M_{aer}) H_2SO_4 по следующей формуле [1]:

$$M_{aer} = \frac{P \cdot \tau_{aer}}{m_{ext}} \quad (1)$$

где P – процентное содержание H_2SO_4 в аэрозольной смеси.

Точность оценки M_{aer} будет зависеть от правильности выбора оптической модели, который осуществляется путем сопоставления между собой измеренных и смоделированных отношений оптических толщин ($\tau_{aer,\lambda1}/\tau_{aer,\lambda2}$) на двух длинах волн 12/11 мкм и 8.5/11 мкм. Использование такого подхода для выбора модели обусловлено тем, что отношение $\tau_{aer,\lambda1}/\tau_{aer,\lambda2}$, определённое по спутниковым данным, в силу малых эффектов многократного рассеяния в ИК диапазоне 8 – 13 мкм, будет равно модельному, вычисленному по теории Ми [2,3]:

$$\frac{\tau_{aer,\lambda_1}}{\tau_{aer,\lambda_2}} \approx \frac{(1 - \omega_{\lambda_1} \cdot g_{\lambda_1}) m_{ext,\lambda_1}}{(1 - \omega_{\lambda_2} \cdot g_{\lambda_2}) m_{ext,\lambda_2}} \quad (2)$$

Правильный выбор оптической модели позволяет определить не только M_{aer} , но и тип аэрозоля, m_{ext} и r_c . Подход по использованию отношений оптических толщин для определения параметров перистых облаков по спутниковым данным в свое время был представлен в работе [2], а также в работах [3,4] для определения параметров вулканического пепла.

Выбрав оптическую модель, можно с помощью выражения (1) определить, как общее массовое содержание аэрозоля. Результаты восстановленных параметров H_2SO_4 представлены на рис. 1.

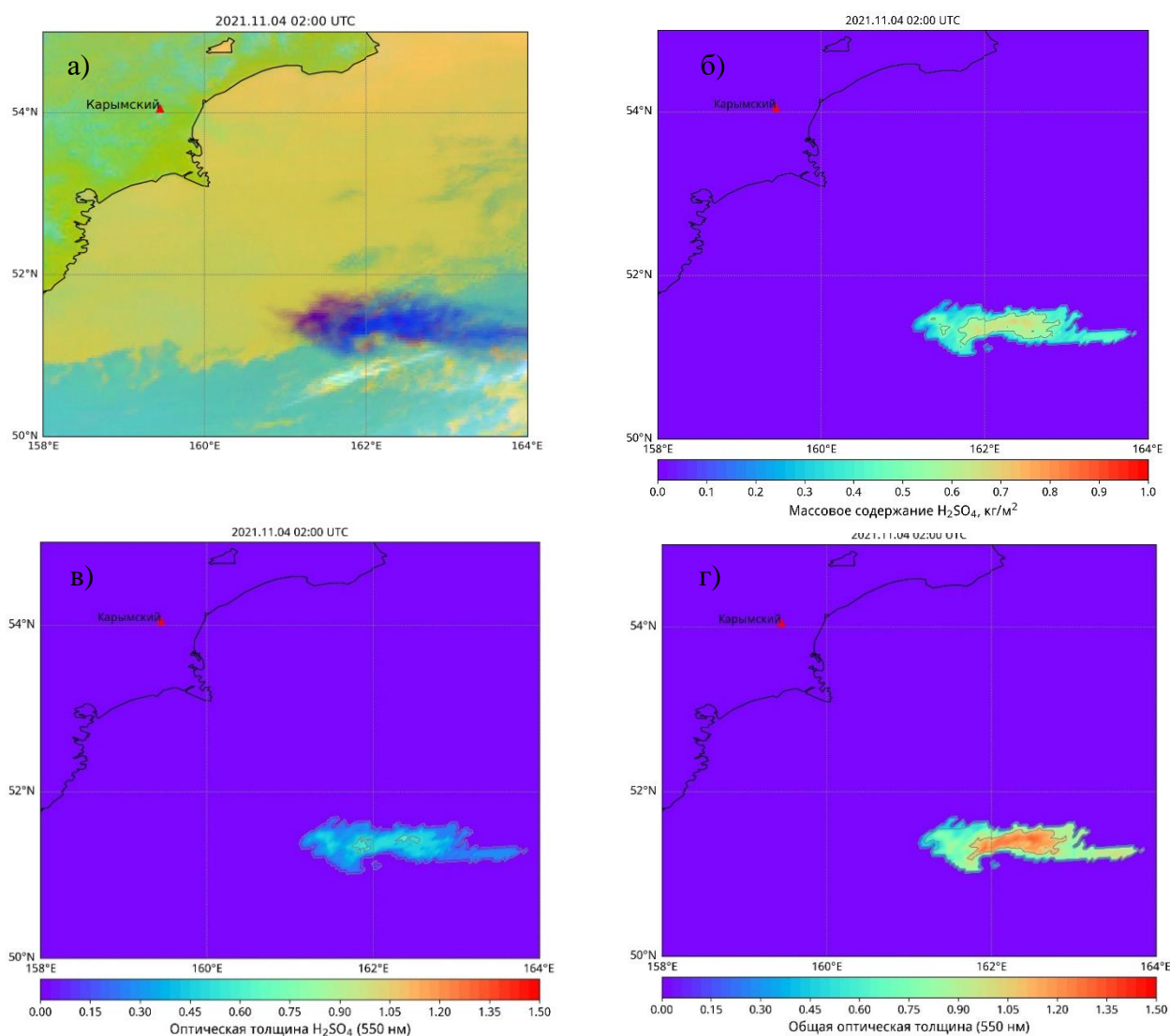


Рисунок 1 – Параметры вулканического H_2SO_4 а) Инвертированное цветосинтезированное изображение АНІ (ВТD₁₂₋₁₁, ВТD_{8,5-11}, ВТ₁₁) б) Массовое содержание H_2SO_4 в) Оптическая толщина H_2SO_4 на длине волны 550 нм г) Общая оптическая толщина вулканического аэрозоля на длине волны 550 нм

Синтез спектральных каналов, представленный на рис 1а, позволяет визуально оценить на спутниковом изображении области с сернистым аэрозолем (синий цвет). Видно, что общая оптическая толщина аэрозоля (рис. 1г) отличается от оптической толщины H_2SO_4 (рис. 1в). Это говорит о том, что сернистое облако представляет собой смесь различных аэрозольных компонентов. В данном случае это смесь H_2SO_4 и воды. Определив из оптической модели долю воды в сернистом облаке, можно оценить массовое содержание H_2SO_4 , которое представлено на рис. 1б.

В ходе работы представлена методика восстановления параметров вулканического H_2SO_4 по спутниковым данным. В основе методики лежит использование оптических моделей для различных смесей аэрозольных компонентов вулканического облака, представленных пеплом, кристаллами льда, каплями воды и каплями H_2SO_4 . Использование многокомпонентных моделей с различными сочетаниями аэрозольных фракций позволило на примере извержения вулкана Карымский правильно оценить спектральные характеристики вулканического облака и восстановить оптическую толщину и массовое содержание H_2SO_4 . Использование такого подхода позволяет специалистам-вулканологам проводить комплексный анализ вулканических облаков для оценки их степени опасности.

1. *Ensor D.S., Pilat M.J.* Calculation of Smoke Plume Opacity from Particulate Air Pollutant Properties // Journal of the Air Pollution Control Association. 1971. V. 21. №. 8. P. 496–501.

2. *Parol F., Buriez J.C., Brogniez G., Fouquart Y.* Information-content of AVHRR channels 4 and 5 with respect to the effective radius of cirrus cloud particles // J. Appl. Meteorol. 1991. V. 30. P. 973–984.

3. *Pavolonis M., Heidinger A.K., Sieglaff J.* Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118. №. 3. P. 1436–1458.

4. *Filei A.A., Marengo F.* Retrieval of volcanic ash parameters from satellite data // Russian Meteorology and Hydrology. 2021. V. 46. No. 4. P. 269–279.