

ХVII Всероссийская Открытая конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА
(Физические основы, методы и технологии мониторинга
окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)»

**Атмосферные проявления от геодинамической
активности сильного землетрясения $M=7.5$
(о. Сулавеси) по данным космического мониторинга**

В.Б. Кашкин¹, Р.В. Одинцов¹, Т.В. Рублева¹, А.А. Романов¹,
К.В. Симонов², Ю.А. Цуп^{1,3}, Е.Г. Швецов³

¹Сибирский федеральный университет

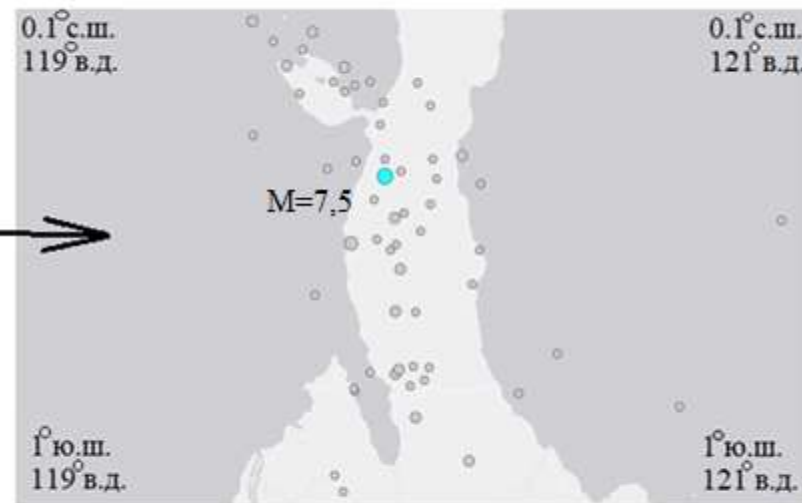
²Институт вычислительного моделирования СО РАН

³Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН

Москва, 2019

Актуально изучение эффектов связи литосферы и атмосферы в период сейсмической и вулканической активности. В работе использованы спутниковые данные, позволяющие наблюдать такие эффекты в сейсмоактивном районе о. Сулавеси в 2018 г. К ним относятся: изменение температуры и влажности на разных изобарических уровнях, вариации общего содержания озона и концентрации диоксида серы. В этом районе в сентябре-октябре 2018 г. наблюдались землетрясение с $M=7,5$, цунами и извержение вулкана.

Геотектоника сейсмоактивного района о. Сулавеси (Индонезия)

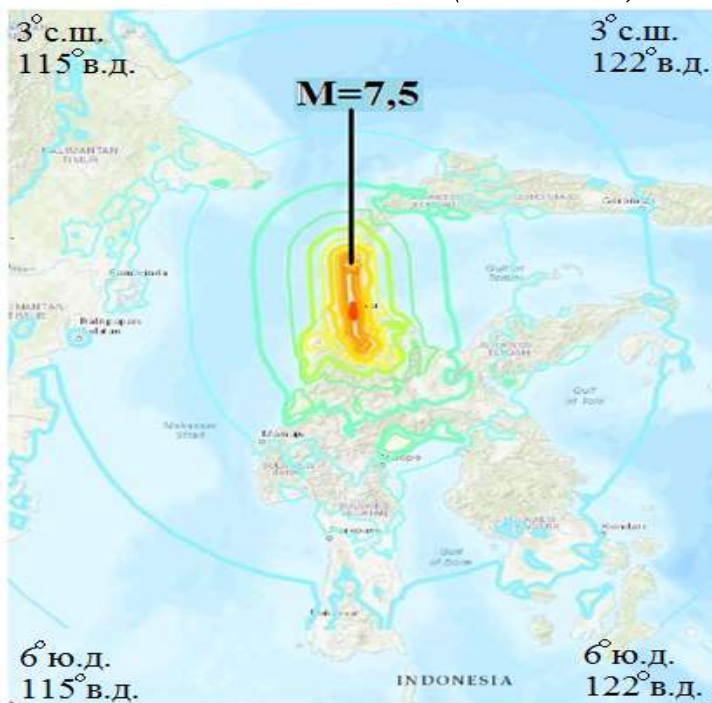


Землетрясение $M=7,5$ произошло
28.09.2018 г. в 10:02:45 UTC.

Район исследования находится в юго-западной части Тихоокеанской субдукционной зоны, в области взаимодействия 4-х тектонических плит: *Австралийской, Тихоокеанской, Филиппинской и Зондской.*

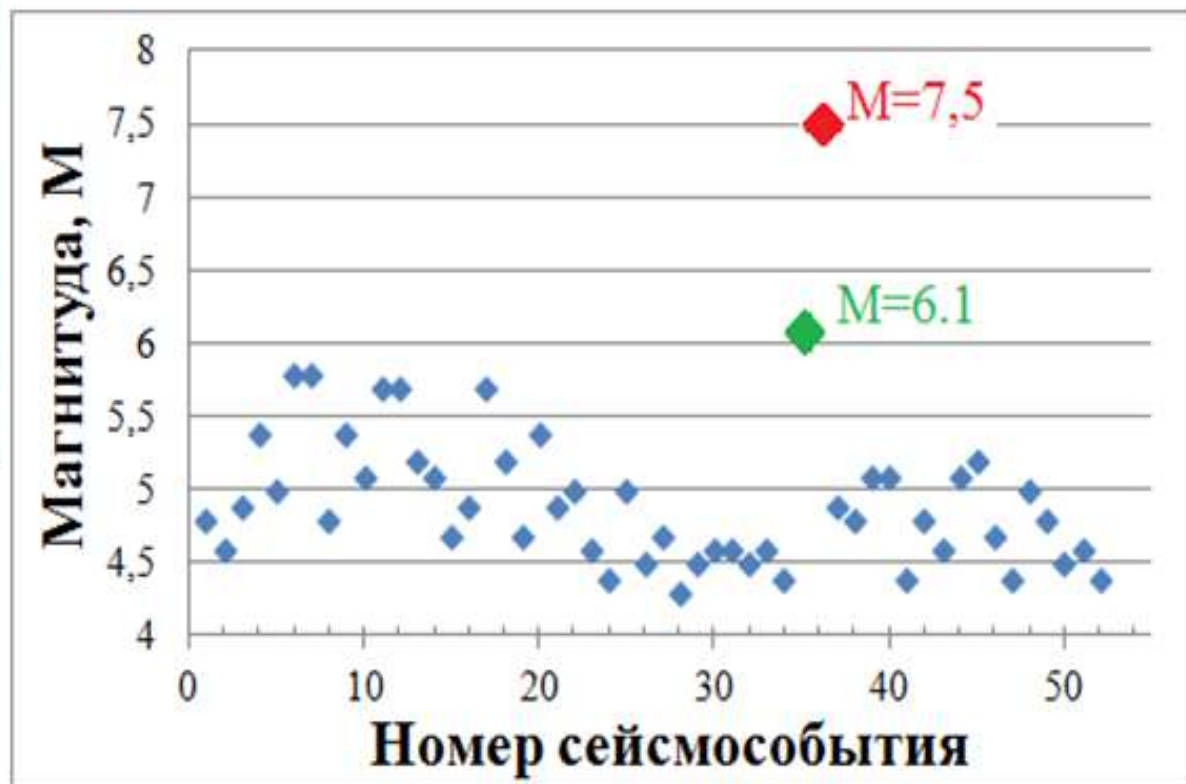
Оценка показателей сейсмических процессов в очаговой области по данным USGS и IRIS

Изосейстовые области землетрясения $M=7,5$ по шкале MMI (USGS)



Координаты эпицентра: $0,256^{\circ}S$ и $119,846^{\circ}E$, глубина гипоцентра 10 км, размеры очага - 200x200 км.

С 21 сентября по 4 октября 2018 г. зарегистрировано 49 сейсмических событий с магнитудами $4,3 \leq M \leq 5,8$ (IRIS). Сильнейший форшок $M=6,1$ произошел за 3 ч. до основного события.



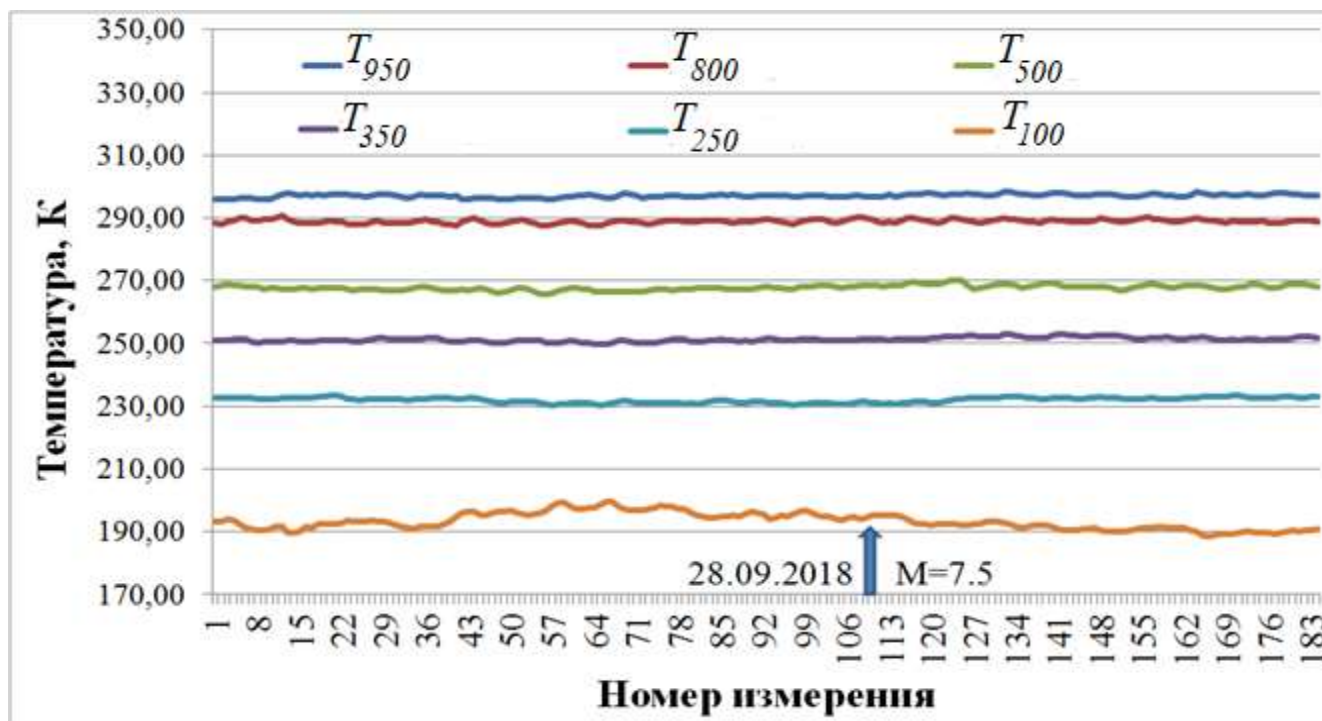
Пример типичных профилей температуры на уровнях 150 и 250 гПа в средних широтах во время сейсмических событий (Чили) по данным ATOVS/POES



Землетрясение $M=4,7$ произошло в море (не далеко от Чили) 16.10.2019 г. в 20:31:59 (UTC), координаты эпицентра $40,322^{\circ}\text{S}$ и $91,805^{\circ}\text{W}$, глубина гипоцентра 10 км.

1. Кашкин В.Б. Внутренние гравитационные волны в тропосфере // *Оптика атмосферы и океана*, 2013. Т. 26, № 10. С. 908-916.
2. Kashkin V.B., Rubleva T.V., Odintsov R.V. Abnormal Geophysical Events in the Northern Hemisphere in 2010 and 2011 / *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2018. 11 (8). P. 982-988. doi: 10.17516/1999-494X-0120

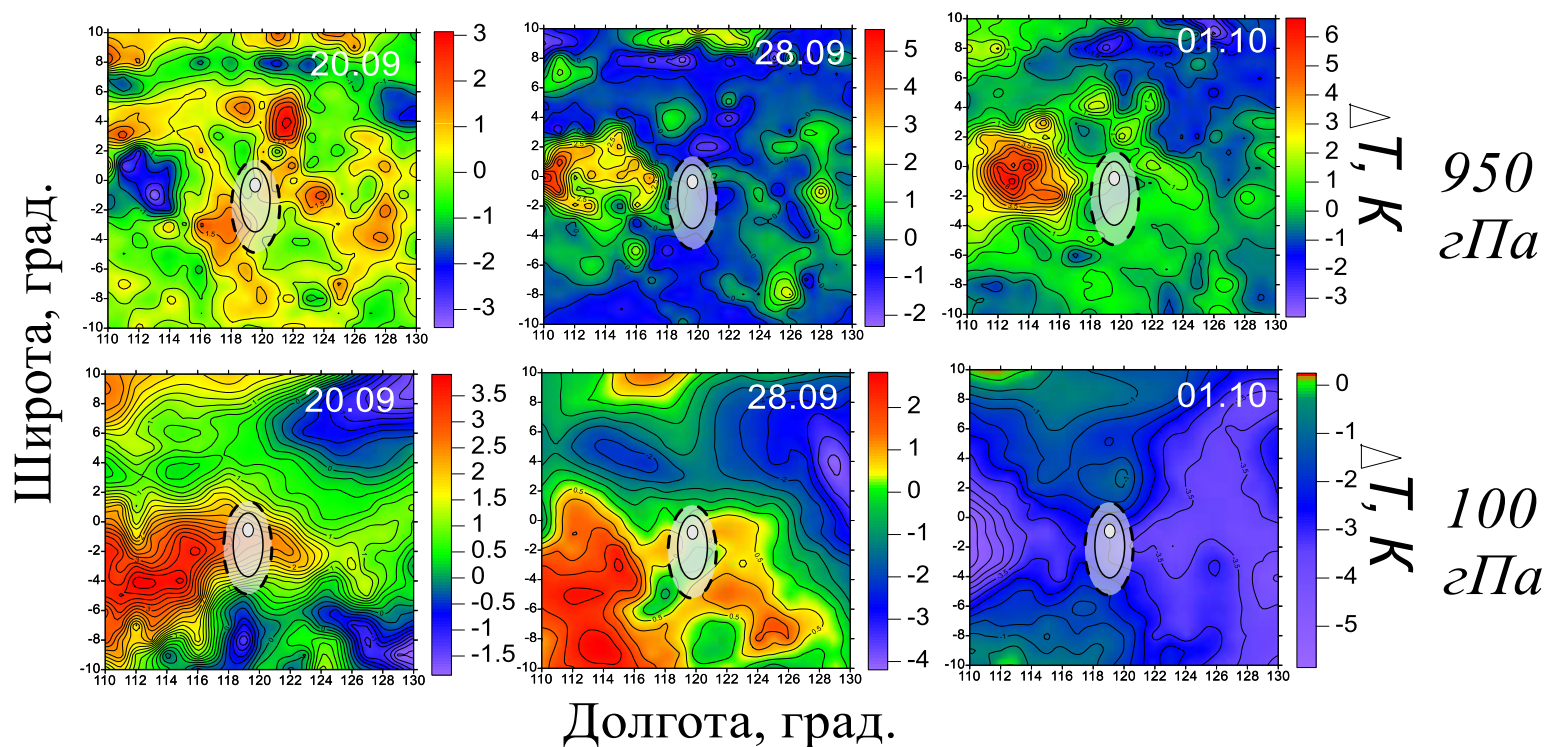
Температурные профили на изобарических уровнях над очагом землетрясения $M=7,5$ по данным АТОВС/РОЕС



Давление, гПа	Высота, м
950	~500
800	~2000
500	~5500
350	~8000
250	~10000
100	~16000

Коэффициент корреляции R между рядами T_{950} и T_{350} , T_{800} и T_{500} , T_{500} и T_{350} , T_{950} и T_{250} положительный и изменяется от 0,36 до 0,61. В тропосфере во время сейсмических процессов над очаговой областью температуры на разных уровнях изменяются синхронно. Коэффициент R между температурными рядами (T_{950}, T_{100}) и (T_{250}, T_{100}) отрицательный и изменяется от -0,25 до -0,8.

Разностные карты аномалий температурного поля на изобарических уровнях 950 и 100 гПа



Над сейсмоактивным районом о. Сулавеси (включая очаговую область) 28 сентября температуры на уровне 950 гПа зарегистрированы ниже среднего значения. В приземном слое аномальная область, расположенная над очагом землетрясения $M=7,5$, находится между двумя аномалиями с повышенными значениями температур.

Модифицированный индекс аномальности

Индекс рассчитывается с целью выявления температурных аномалий по спутниковым данным*. Модифицированный индекс аномальности:

$$\delta T = \frac{T(\varphi_i, \lambda_i, N, t, p) - T_{\phi}(\varphi_i, \lambda_i, t, p)}{\sigma_T}$$

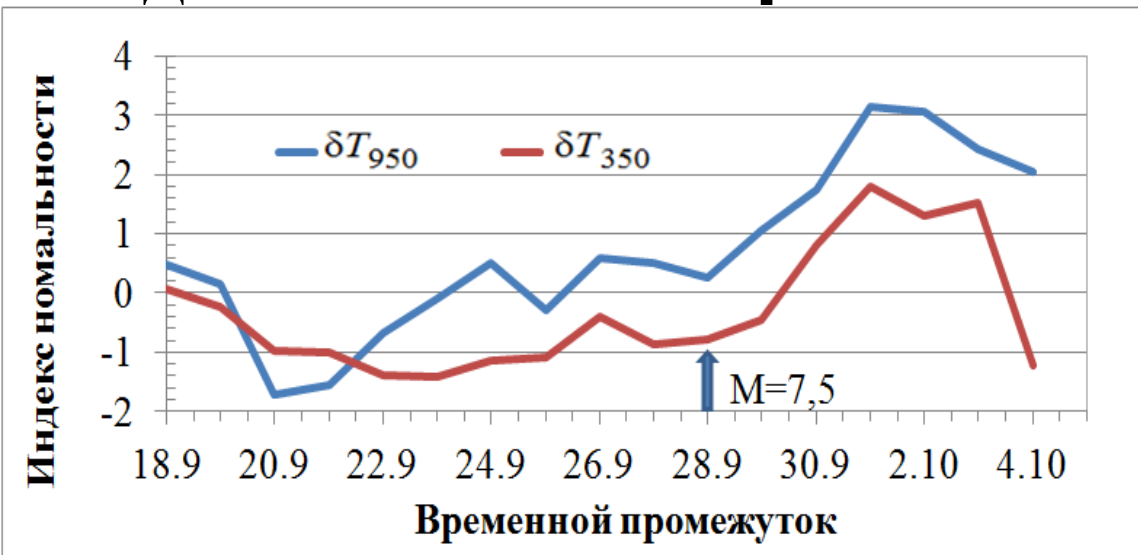
где φ_i – географическая широта, λ_i – географическая долгота, N – дата, t – время измерения, p – давление на изобарической поверхности, $T(\varphi_i, \lambda_i, N, t, p)$ – температура в возмущенной атмосфере над эпицентром на дату N и время t на определенном изобарическом уровне p , $T_{\phi}(\varphi_i, \lambda_i, t, p)$ – фоновая средняя температура за исследуемый период для времени t и давления p , σ_T – среднеквадратичное отклонение.

* Шокин Ю.И., Добрецов Н.Н., Мамаш Е.А., Кихтенко В.А., Воронина П.В., Смирнов В.В., Чубаров Д.Л. Информационная система приема, обработки и доступа к спутниковым данным и ее применение для решения задач мониторинга окружающей среды // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 5. С. 157–174.

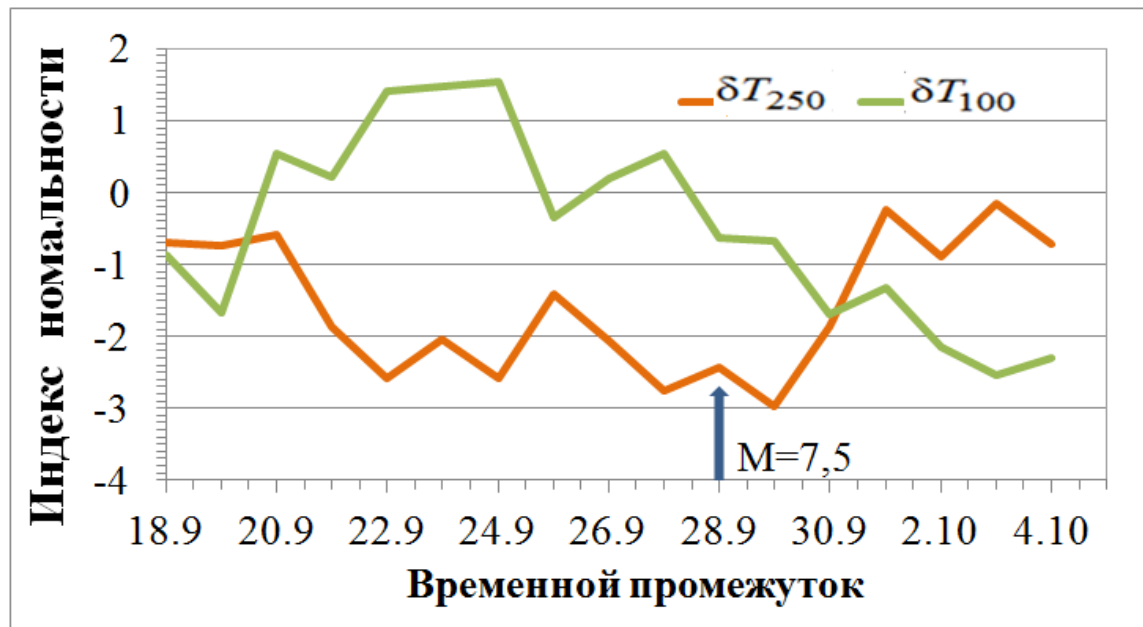
Вариации индекса δT

над очагом землетрясения $M=7,5$

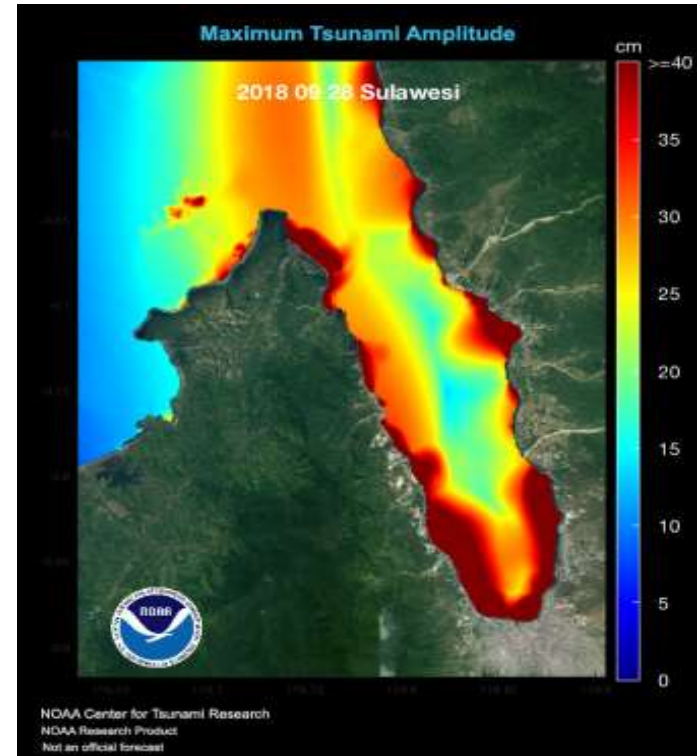
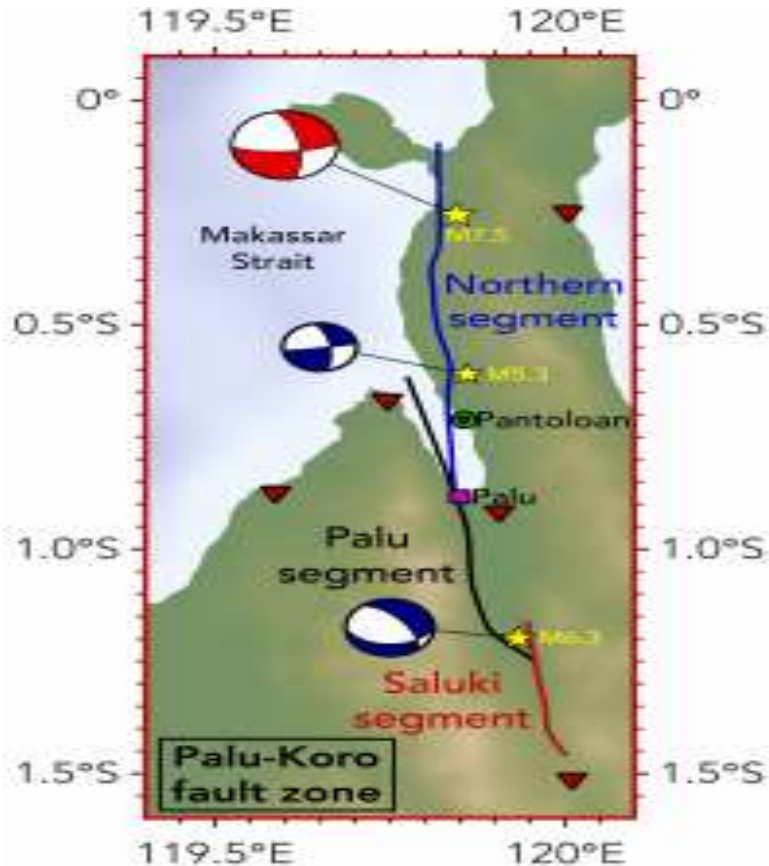
$R = 0.78$, индексы δT_{950} и δT_{350} на уровнях 950 и 350 гПа изменяются синхронно. Понижение параметра δT_{950} на уровне 950 гПа произошло за 8 дней до сейсмособытия.



$R = -0,76$, индексы δT_{250} и δT_{100} изменяются в противофазе. С 20 по 24 сентября, во время подготовки землетрясения $M=7,5$, в верхней тропосфере параметр δT_{250} отрицательный, в нижней стратосфере — δT_{100} положительный (эффект атмосферной «бабочки»).



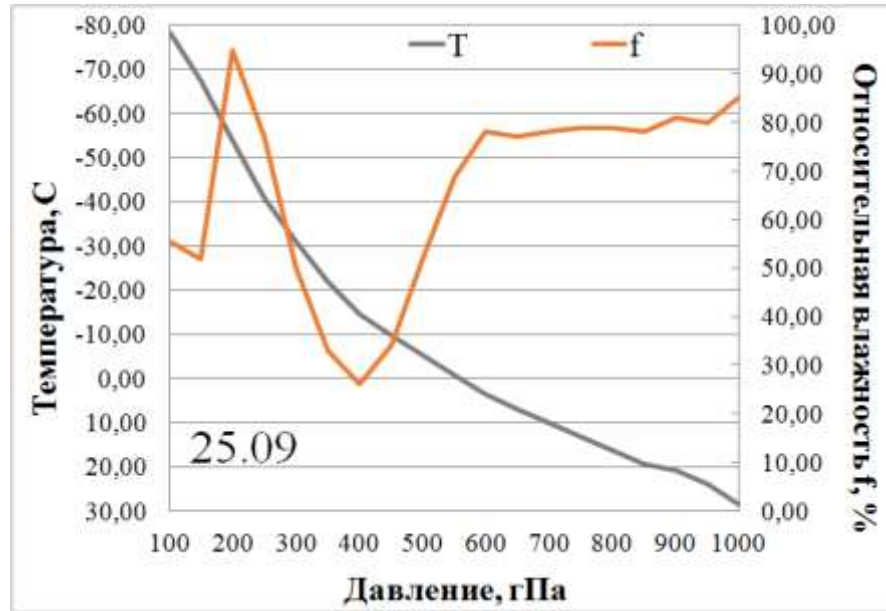
Проявление цунами 28.09.2018 г.



После землетрясения $M=7,5$ через 7-12 минут возникло заметное цунами, зарегистрированы 2 волны с интервалами 5 и 10 мин.

Вдоль побережья о. Сулавеси волны достигали высоты 1,5 - 2 м. В заливе Палу, ставшим водной «воронкой», высота волн составляла от 6 до 10 м.

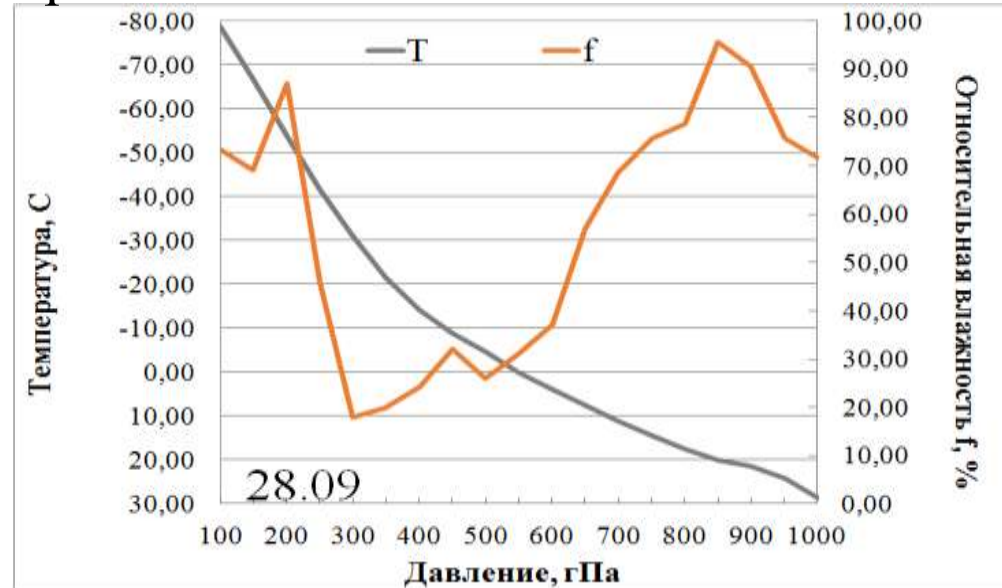
Зависимость температуры и относительной влажности от давления



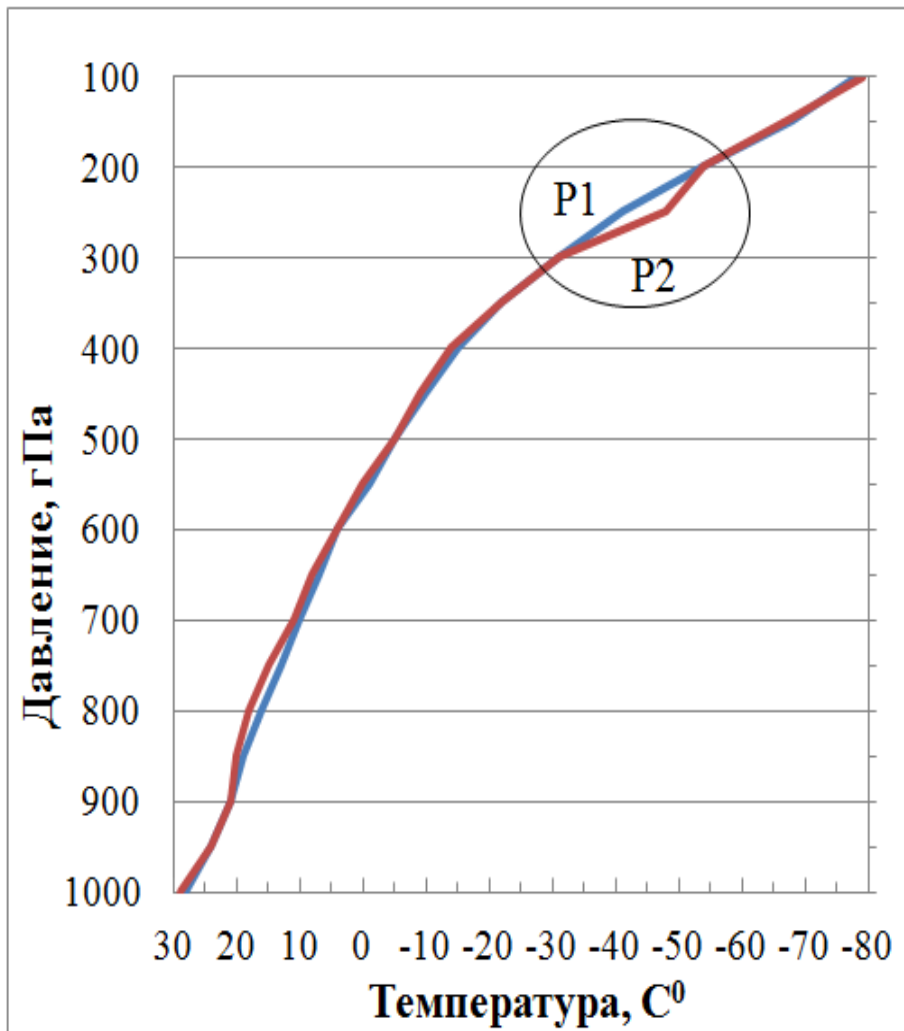
Температурные профили за 25 и 28 сентября показывают, что в реальных условиях T монотонно уменьшается на уровнях от 1000 до 100 гПа.

25 сентября относительная влажность f в слое 1000-600 гПа держится около 80%, снижение параметра f наблюдается в атмосферном слое 600-400 гПа, а ее рост – в слое 400-200 гПа.

28 сентября происходит рост относительной влажности (f) в приземном слое 1000-850 гПа над очаговой областью. Снижение параметра f происходит в слое 850-300 гПа, а в районе тропопаузы 300-200 гПа происходит резкое увеличение влажности.



Распределение температуры и давления над эпицентральной областью землетрясения $M=7,5$ за 25 и 28 сентября



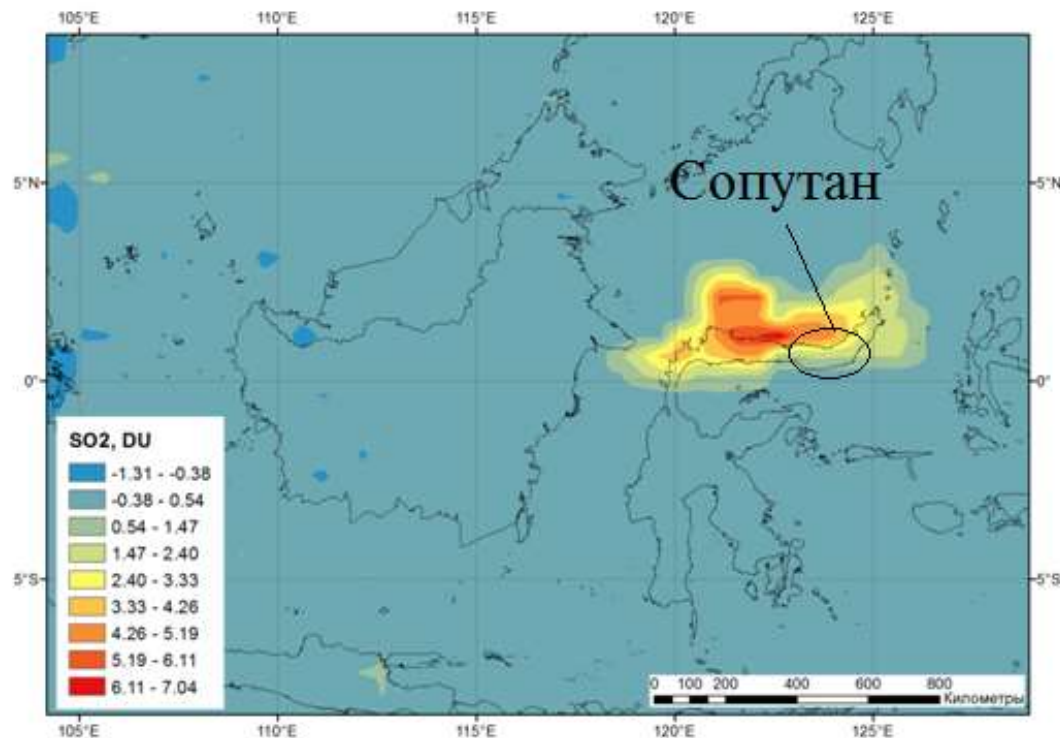
За час до сильного землетрясения ($M=7,5$) и возникновения цунами обнаружен «скачок» температуры на уровне 250 гПа в 9 часов (UTC).

- .

Вулканическая активизация: проявление диоксида серы над о. Сулавеси за 4 октября по данным OMI/AURA

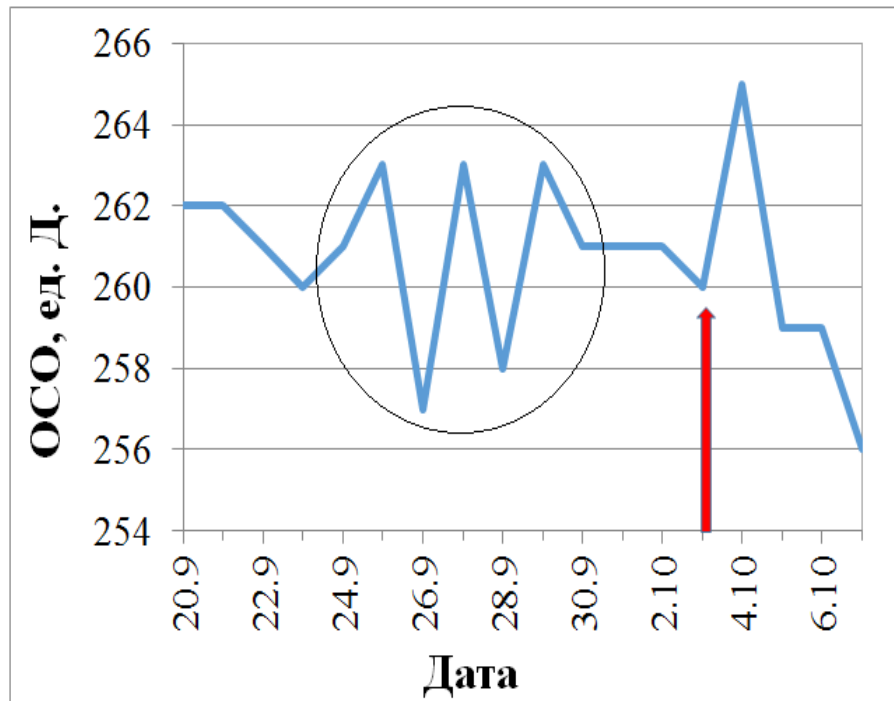


4 октября над о. Сулавеси сформировалось облако диоксида серы в нижней стратосфере (в слое 14-16 км), которое в последствии сместилось в направлении N-W. Погрешность оценки диоксида серы ~ 1 DU, $1 \text{ DU} = 2,69 \cdot 10^{16}$ молекул/см².

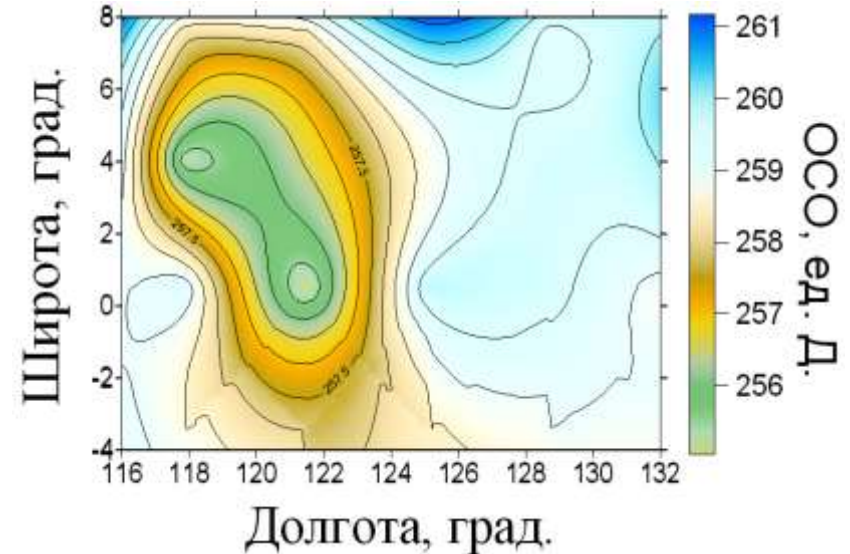


Извержение стратовулкана Сопутан ($1^{\circ}108'N$ и $124^{\circ}73'E$), который находится в 550 км от эпицентра землетрясения $M=7,5$, произошло 3 октября в 08:44 UTC и длилось 6 минут. Образовался пепловый шлейф, поднявшийся до высоты 5,8 км.

Вариации общего содержания озона (ОСО) по данным OMI/AURA в период вулканической активности



*Визуализация данных ОСО
за 3 октября 2018 г.*



1 ед. Д. = 10^{-5} м.

С 25 по 29 сентября 2018 г. наблюдаются колебания озона, предположительно связанные с сейсмической активностью в исследуемом районе, 3 октября выявлена аномальная область с пониженным значением общего содержания озона (ОСО) в момент вулканической активности. Повышение ОСО над сейсмоактивным районом о.Сулавеси наблюдалось 4 октября.

Заключение

Исследован феномен Сулавесского землетрясения ($M=7.5$) по данным космического мониторинга. Детально изучены кооперативные явления, связанные с взаимодействием геодинамики и атмосферы, например, эффект атмосферной «бабочки» над районом сильнейшего землетрясения.

Обнаружен «скачок» температуры в районе тропопаузы за час до этого подводного землетрясения и цунами. В приземном слое 1000-850 гПа над очаговой областью в этот момент наблюдается рост относительной влажности. Снижение этого параметра происходит в тропосферном слое (850-300 гПа), а в районе тропопаузы (300-200 гПа) – резкое увеличение влажности.

Возникшая вулканическая активность в районе землетрясения вызвала заметные вариации в распределении общего содержания озона, а выбросы пеплового шлейфа привели к образованию аномалии озона и формированию облака диоксида серы.

Спасибо за внимание!