

АНОМАЛИИ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ В СЕЙСМИЧЕСКИ АКТИВНОМ РЕГИОНЕ ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ

Свердлик Л.Г. (l.sverdlik@mail.ru)

Научная Станция Российской Академии Наук в г. Бишкеке (НС РАН)
Кыргызско-Российский Славянский Университет (КРСУ), Высокогорная
Обсерватория Физики Атмосферных Процессов КРСУ и НС РАН



23 Международная Конференция «Современные проблемы
дистанционного зондирования Земли из космоса»
Институт Космических Исследований РАН, Москва,
10-14 ноября, 2025

ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс в развитии и совершенствовании спутниковых технологий, многообразие информации, а также доступность большого количества специализированных сервисов и баз данных позволяет проводить исследования воздействия сильных землетрясений на атмосферу с целью выявления закономерностей в изменении различных ее параметров. Особенно активно подобные исследования проводятся в последние десятилетия.

Одним из проявлений сейсмоатмосферных возмущений являются тепловые аномалии, наблюдаемые на различных уровнях атмосферы, что подтверждается экспериментами в различных регионах мира. Как правило, в качестве анализируемых параметров используются:

- температура в нижней тропосфере (ТА),
- яркостная температура (ВТ),
- поверхностный скрытый тепловой поток (SLHF),
- уходящее длинноволновое излучение (OLR),
- тепловое инфракрасное излучение (TIR)

и т.д., которые обычно объединяют понятием **тепловые аномалии** в нижней атмосфере.

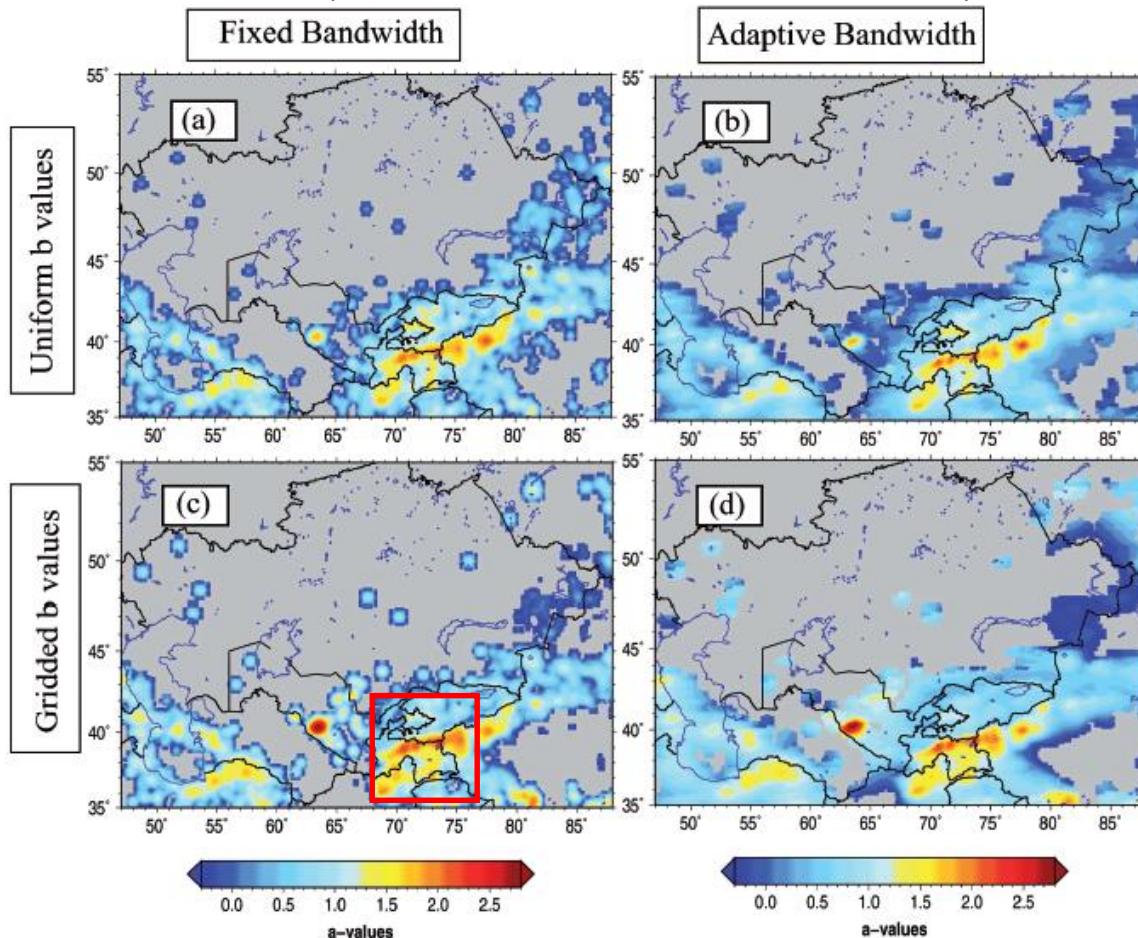
Но несмотря на такое разнообразие используемых параметров атмосферы и подходов к выделению предсейсмических аномалий на практике результаты исследований указывают, что существуют значительные **проблемы с повторяемостью и подтверждением** результатов.

Наш подход к исследованию возмущений, предшествующих сильным землетрясениям, основан на использовании данных наблюдений за эволюцией вертикальной структуры температуры верхней тропосферы и нижней стратосферы (*Upper Troposphere and Lower Stratosphere* – UTLS) и анализе особенностей пространственно-временной изменчивости с учетом связи между вариациями температуры на различных изобарических уровнях. Задача выделения предсейсмических возмущений в UTLS решалась с использованием специального алгоритма, который ранее уже применялся к событиям в нескольких регионах Азии и Европы.

Цель настоящего исследования состояла в дополнительном тестировании алгоритма на примере шести землетрясений с магнитудами $M \geq 6,0$, произошедшими в 2015–2016 гг. в сейсмоактивном регионе Центральной Азии.

Сейсмическая активность исследуемого региона

Для установления общих закономерностей проявления сейсмоатмосферных эффектов, были проанализированы сильные землетрясения, произошедшие в наиболее сейсмически активном регионе Центральной Азии (Афганистан, Кыргызстан, Таджикистан).



Для оценки рисков, вызванных природными явлениями, в данном случае, сильными землетрясениями, часто используется вероятностный анализ сейсмической опасности (PSHA).

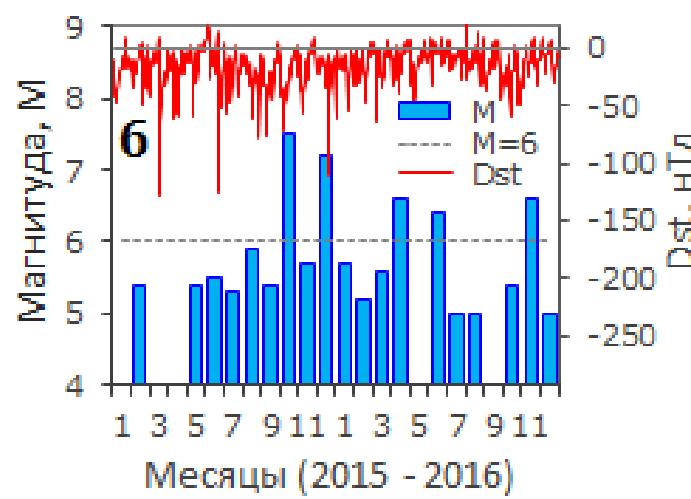
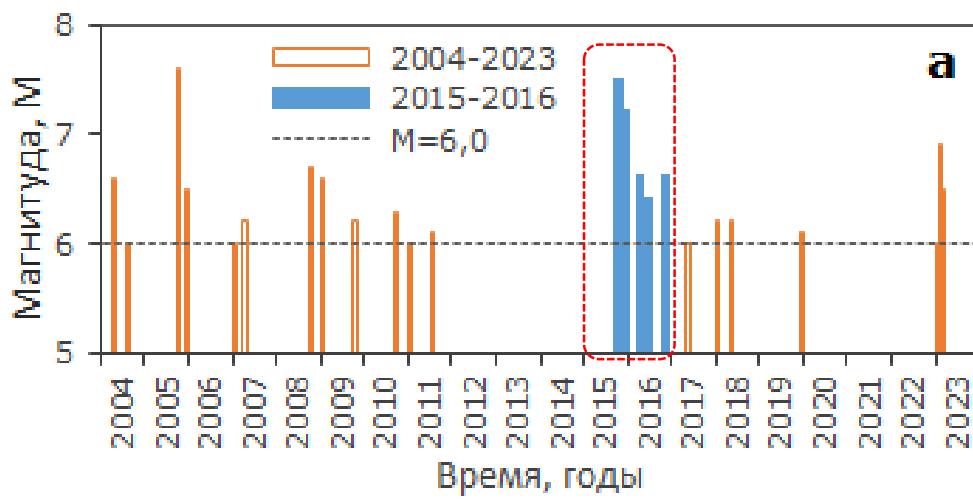
Прирост показателей сейсмической активности при различных вариантах обработки данных

Ullah S., Bindi D., Pilz M., Danciu L., Weatherill G., Zuccolo E., Ischuk A., Mikhailova N.N., Abdurakhmatov K., Parolai S. Probabilistic seismic hazard assessment for Central Asia // Annals of Geophysics. 58. 1. 2015. S0103. doi:10.4401/ag-6687

Временное распределение землетрясений с магнитудами $M > 6,0$ в исследуемом регионе

Исследование атмосферных эффектов крупных землетрясений проводилось в одном из самых активных с сейсмической точки зрения внутриконтинентальных регионов мира, расположенном в Центральной Азии и ограниченном координатами $34\text{--}42^\circ\text{ N}$ и $68\text{--}76^\circ\text{ E}$. Согласно данным онлайн-версии мирового каталога Геологической службы США (USGS) за последние два десятилетия здесь произошло 27 землетрясений с магнитудами $M \geq 6,0$.

В качестве примеров для демонстрации особенностей воздействия землетрясений на атмосферу выбран непрерывный период сейсмической активности с октября 2015 г. по декабрь 2016 г., в течение которого произошло 200 землетрясений с магнитудами $M \geq 4,5$ и 6 крупных событий с $M > 6,0$.



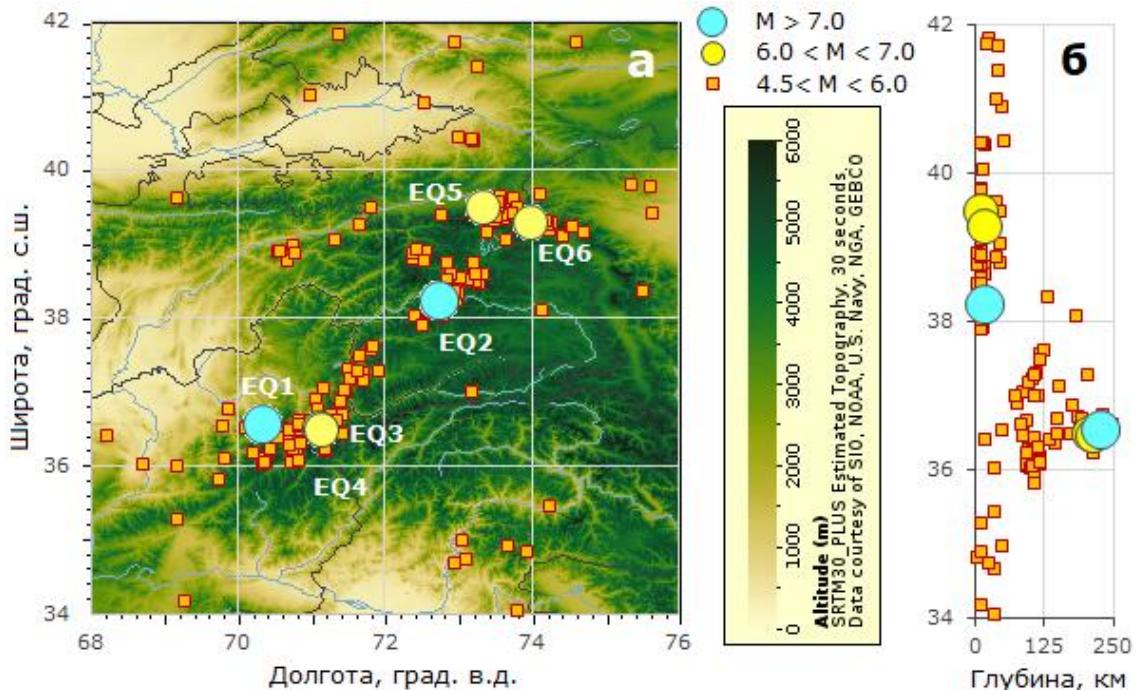
Распределение по времени магнитуд землетрясений ($M \geq 6,0$), зарегистрированных в пределах территории с координатами $34-42^\circ$ с.ш., $68-76^\circ$ в.д. в 2004–2023 гг. (а). Последовательность магнитуд землетрясений ($M \geq 4,5$) и вариации среднесуточных значений индекса геомагнитной активности D_{ST} в 2015–2016 гг. (б)

Данные сейсмических измерений

Для настоящего исследования выбраны землетрясения с магнитудами $M \geq 6.0$, произошедшие в 2015–2016 гг. в Афганистане, Таджикистане и Кыргызстане. Характеристики приведены в Таблице.

Таблица 1. Характеристики землетрясений (EQ) $M > 6.0$ (<https://earthquake.usgs.gov>)

№	Дата	Время, UTC	Широта, N	Долгота, E	D, км	M	Расположение эпицентров
EQ1	26.10.2015	9:09:42	36,52	70,37	231,0	7,5	Гиндукуш, Афганистан
EQ2	07.12.2015	7:50:05	38,21	72,78	22,0	7,2	104 км от Мургаба, Таджикистан
EQ3	25.12.2015	19:14:47	36,49	71,13	206,0	6,3	42 км от Ишкашима, Афганистан
EQ4	10.04.2016	10:28:58	36,47	71,13	212,0	6,6	42 км от Ишкашима, Афганистан
EQ5	26.06.2016	11:17:11	39,48	73,34	13,0	6,4	92 км от Кызыл-Эшме, Кыргызстан
EQ6	25.11.2016	14:24:30	39,27	73,98	17,0	6,6	122 км от Мургаба, Таджикистан



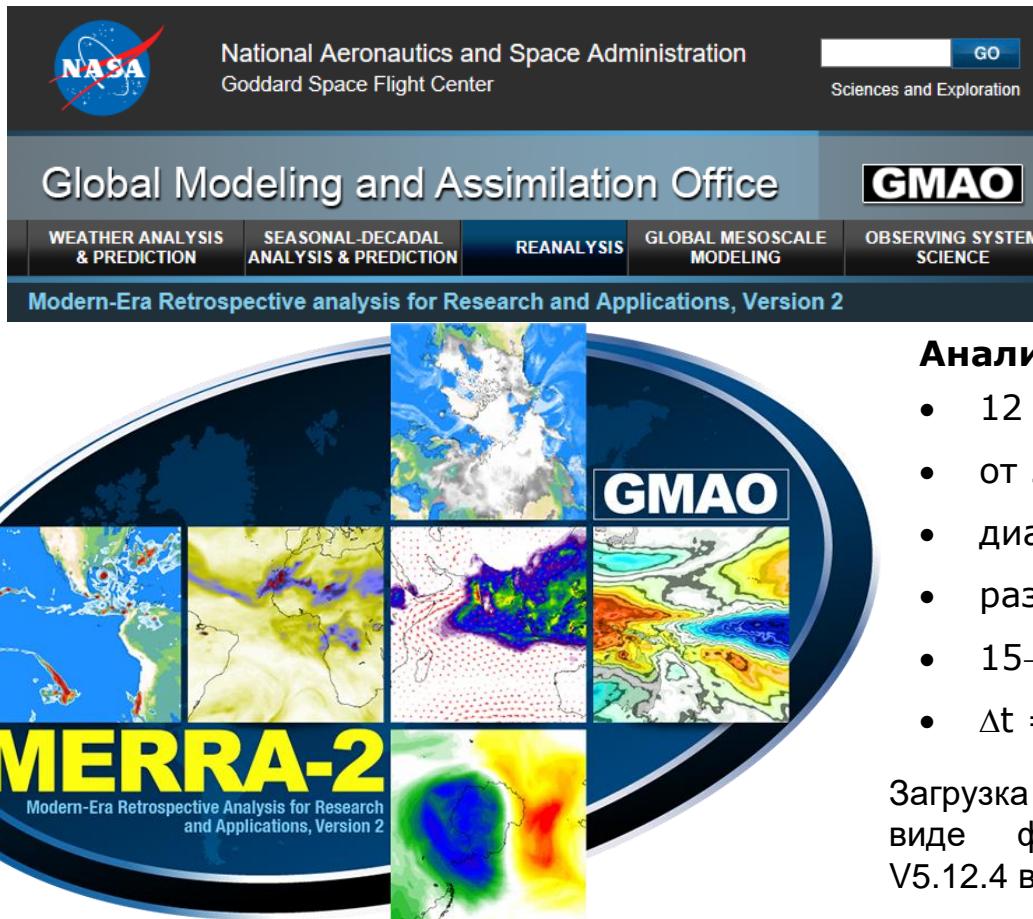
Расположение эпицентров землетрясений с магнитудами $M \geq 6.0$ (2015–2016 гг.)

Распределение гипоцентров по глубине, построенное в виде проекции на вертикальную плоскость, ориентированную в направлении север – юг свидетельствует, что очаги землетрясений под Гиндукушем достигали глубины 250 км, в то время как в восточной части зоны сочленения Тянь-Шаня и Памира их глубина (D) не превышала 30 км.

Данные спутниковых измерений температуры (глобальный реанализ MERRA-2)

MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications)
(<https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>)

В исследовании предсейсмических аномалий использовались трехмерные массивы температуры и горизонтальной скорости ветра из архива глобального реанализа MERRA-2 на 12 стандартных изобарических уровнях от 500 до 40 гПа с временным разрешением $\Delta t=3$ ч с разрешением $0.5^\circ \times 0.625^\circ$.



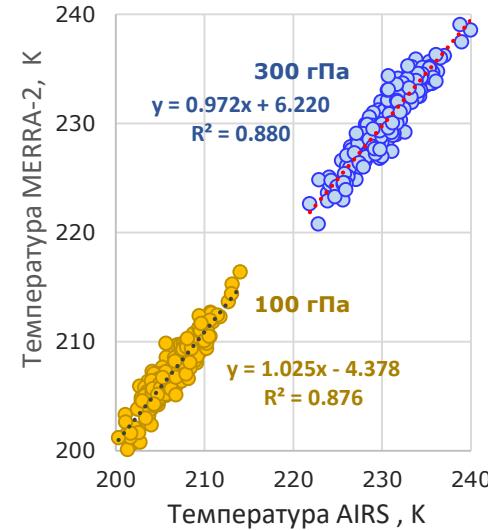
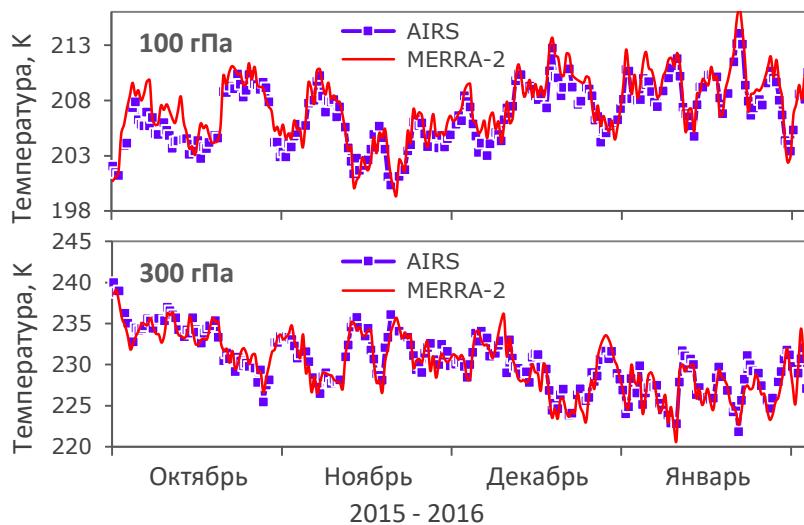
Анализируемые данные $T(t)$:

- 12 уровней давления;
- от 500 до 40 гПа;
- диапазон высот $\sim 5.0\text{--}24.0$ км;
- разрешение $0.5^\circ \times 0.625^\circ$;
- $15\text{--}55^\circ$ с.ш. и $20\text{--}120^\circ$ в.д.;
- $\Delta t = 3$ ч.

Загрузка метеоданных проводилась в виде файлов M2I3NPASM Версии V5.12.4 в формате netCDF

Сравнение температурных данных MERRA-2 и AIRS

Данные реанализа MERRA-2 в период сейсмической активности с октября 2015 г. по январь 2016 г., были сопоставлены с соответствующими спутниковыми измерениями AIRS (Aqua), которые обеспечивают **высокоточные** детальные измерения с глобальным покрытием Земли как днем, так и ночью (AIRX3STD v7.0 Temperature_A и AIRX3STD v7.0 Temperature_D). Коэффициенты корреляции (R) между модельными и спутниковыми данными на уровнях 300 и 100 гПа составляли 0,94.



Результаты сравнения вариаций температуры по данным реанализа MERRA-2 и спутниковыми измерениями AIRS на уровнях 100 гПа (а) и 300 гПа (б) в период с октября 2015 г. по январь 2016 г.

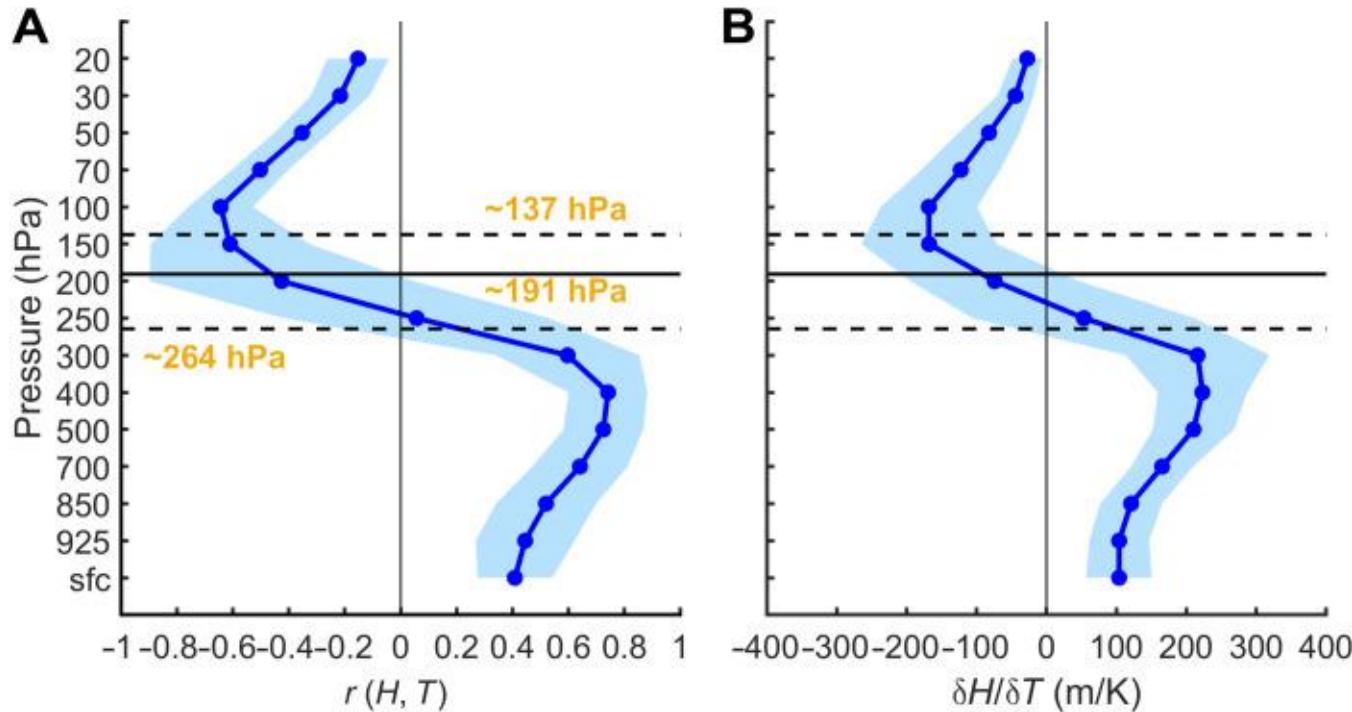
Таблица – Средние значения температуры, параметры линейных уравнений ($y=a+b*x$), коэффициенты корреляции (R) и детерминации (R^2), среднеквадратичная ($RMSE$) и средняя абсолютная ошибка (MAE) между значениями $T_{MERRA-2}$ и T_{AIRS} в период с октября 2015 г. по январь 2016 г. (количество точек данных $n=216$)

Level	T_{AIRS} , K	$T_{MERRA-2}$, K	Linear regression parameter				$RMSE$, K	MAE , K
	Mean \pm SD	Mean \pm SD	a	b	R	R^2		
AIRS vs MERRA-2								
100 гПа	$206,7 \pm 2,7$	$207,5 \pm 3,4$	1,03	-4,48	0,94	0,876	1,33	1,07
300 гПа	$230,3 \pm 3,4$	$230,1 \pm 3,6$	0,97	6,2	0,94	0,880	1,23	0,97

Наблюдаемые незначительные расхождения в температурных данных могут являться не столько следствием использования в схемах реанализа различных физических предположений, численных моделей и пр., а смещением **координатных сеток**: 33,0–34,0 °N; 77,5–78,75 °E для MERRA-2 и 33,5–33,5 °N; 77,5–78,5 °E для AIRS.

Особенности вертикальной структуры UTLS

Изменчивость высоты тропопаузы тесно связана с термической структурой верхней тропосферы и нижней стратосферы (UTLS). Особенности вертикальной структуры UTLS проявляются в изменениях профилей коэффициента линейной регрессии между высотой и температурой тропопаузы, которые имеют типичную S-образную форму.



- (A) Средние коэффициенты корреляции (r) между ежемесячными аномалиями H и T в тропосфере и стратосфере за 1980–2020 гг.
- (B) - для вертикального профиля коэффициентов регрессии (m/K) между H и температурой на данной высоте ([Meng et al., 2021](#))

Meng L., Jane L., Tarasick D.W. et al. Continuous rise of the tropopause in the Northern Hemisphere over 1980–2020 // Sci. Adv. 2021. V 7. Iss. 45. [DOI: 10.1126/sciadv.abi80](https://doi.org/10.1126/sciadv.abi80).

Алгоритм выделения и идентификации предсейсмических возмущений

Критерий STA / LTA (Short-Time-Average / Long-Time-Average)

Идентификация возмущений температуры в UTLS производилась с использованием алгоритма, основанного на анализе отношения статистических показателей в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах. Формула расчета критерия STA/LTA (<https://rdrr.io/cran/IRISSeismic/man/STALTA.html>):

$$R(t_i, p_k) = \frac{STA(t_i, p_k)}{LTA(t_i, p_k)} = \frac{1}{N_S} \sum_{i=N_S}^i CF(t_i, p_k) \Big/ \frac{1}{N_L} \sum_{i=N_L}^i CF(t_i, p_k) \geq THR$$

где: t_i - время текущей выборки временного ряда Т на уровне p_k ; N_S - короткое (STA) временное окно (2÷4 суток); N_L - длинное (LTA) окно (13÷15 сут.); $CF(t_i)$ - характеристическая функция в момент времени t_i и порог обнаружения аномалии THR. Межсуюточная изменчивость ΔT :

$$\Delta T(t, \delta) = T(t_i) - T(t_{i-\delta})$$

где: $\delta = m \times \Delta t$; m - число отсчетов; $\Delta t = 3$ h – шаг дискретизации.

Отношение скользящих дисперсий (VAR): $R(t_i) = VAR_{STA}(t_i) / VAR_{LTA}(t_i)$

Изменения температуры на двух уровнях в верхней тропосфере **UT** и нижней стратосфере **LS** были сведены к единому численному показателю (интегральным параметрам аномальных вариаций δT и δT_C):

$$\delta T(t_i) = R(t_i, p_{UT}) \times R(t_i, p_{LS}) \geq THR$$

$$\delta T_C(t_i) = \begin{cases} 0,00 & \text{если } -r(t_i)_{STA} \geq 0 \\ \delta T(t_i) \times |r(t_i)_{STA}| & \text{если } -r(t_i)_{STA} < 0 \end{cases}$$

Возмущенному состоянию UTLS соответствовали флюктуации температуры, удовлетворяющие условиям: $R_{UT} > 1,0$ и $R_{LS} > 1,0$; а значения параметра $\delta T_C > THR = 1,5$ считались аномальными.

Идентификация предсейсмических аномалий температуры основывалась на трех известных положениях критерия **DTS-T** (Deviation-Time-Space-Thermal) (Qin et al., 2013; Rasheed et al., 2024):

- 1) значительное отклонение наблюдаемого параметра от своих фоновых значений;
- 2) квазисинхронное поведение аномалий во времени;
- 3) устойчивые в пространстве аномалии располагаются вблизи эпицентральных областей.

Пространственные характеристики возмущений температуры определялись с помощью приложения IPPLA.

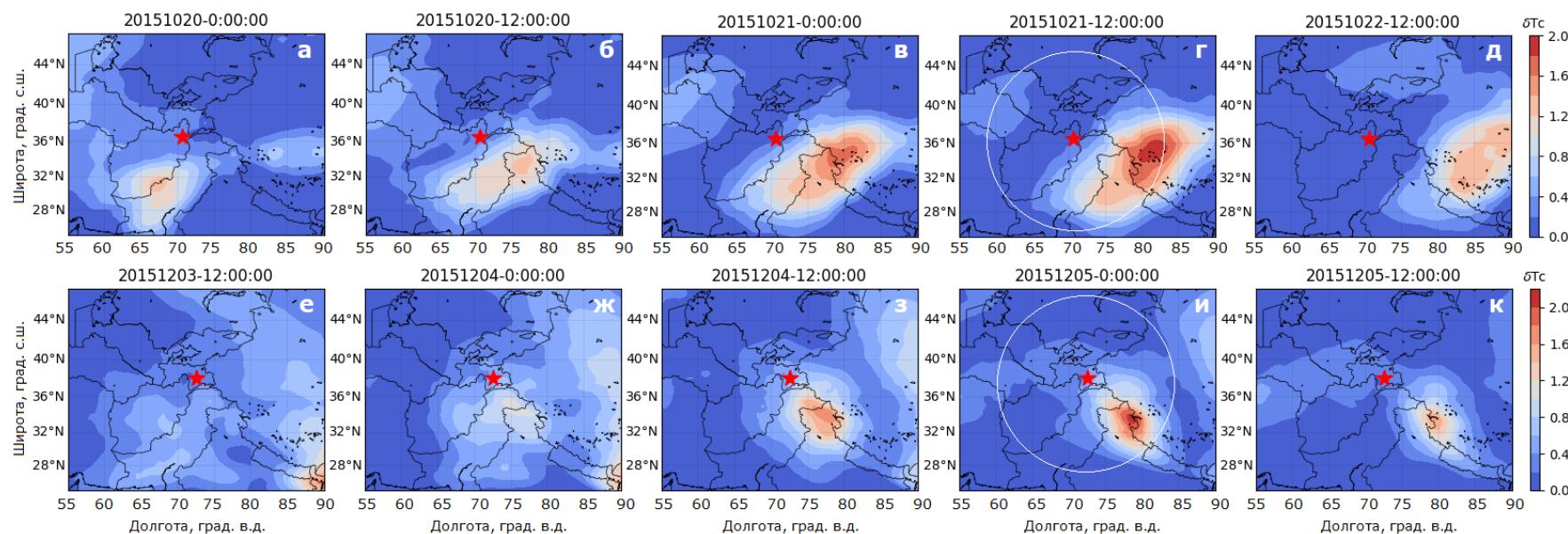


Результаты выделения предсейсмических возмущений температуры

Результаты расчета пространственно-временного распределения интегрального параметра δT_C в предсейсмические периоды событий $M=7,5$ (26.10.2015) и $M=7,2$ (07.12.2015) демонстрируют все стадии процесса эволюции аномалий температуры в периоды с 20 по 22 октября и с 03 по 05 декабря 2015 г.

Максимум в развитии возмущения температуры в UTLS наблюдался 21 октября 2015 г. за ~5 суток до события $M=7,5$ в Афганистане. Аналогичные изменения пространственного распределения возмущения температуры, указывающие на согласованное поведение температуры и сейсмичности, наблюдались за 2–3 суток до землетрясения $M=7,2$ в Таджикистане.

Области устойчиво высоких значений параметра $\delta T_C \geq 1,5$ могут быть идентифицированы как значительные предсейсмические тепловые аномалии в верхней тропосфере и нижней стратосфере.

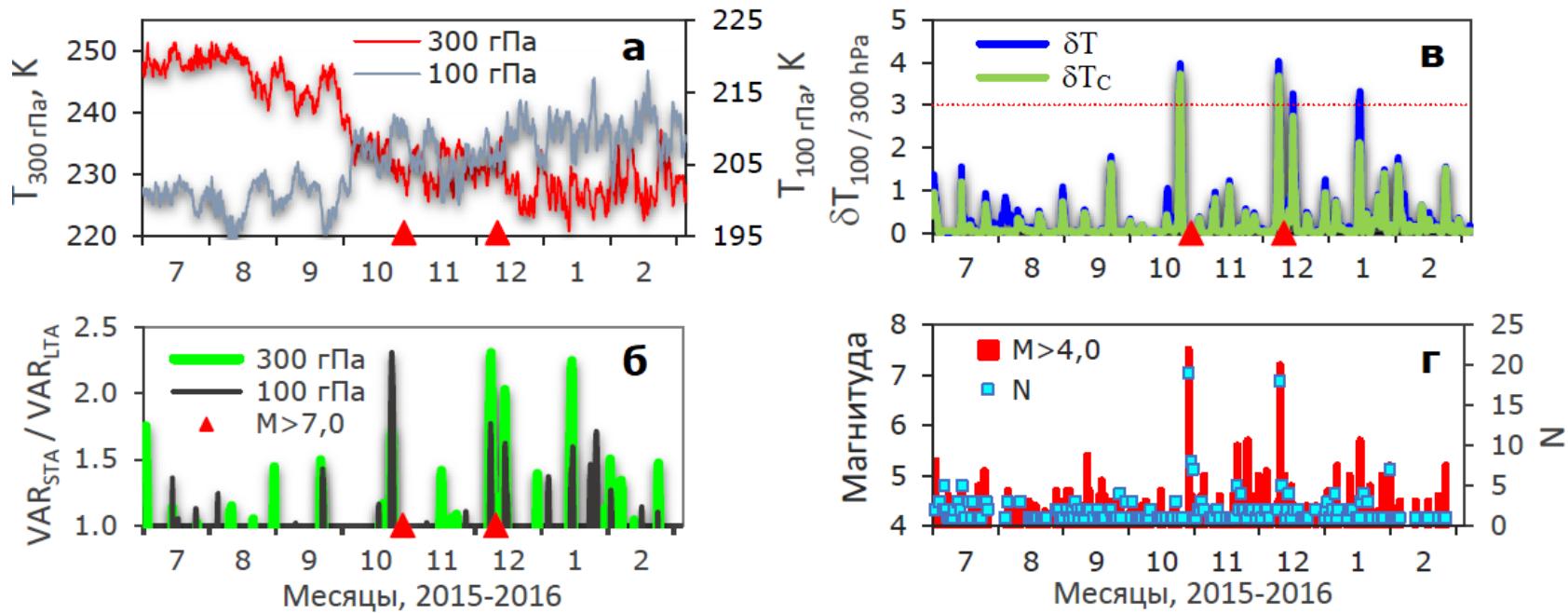


Эволюция пространственного распределения параметра δT_C в периоды с 20 по 22 октября 2015 г. (а–д) и с 03 по 05 декабря 2015 г. (е–к). Маркерами показаны эпицентры землетрясений $M=7,5$ (26.10.2015; 09:09:42 UTC; $36,52^\circ$ с.ш.; $70,37^\circ$ в.д.) и $M=7,2$ (07.12.2015; 07:50:05 UTC; $38,21^\circ$ с.ш.; $72,78^\circ$ в.д.) (Афганистан / Таджикистан). Белые круги обозначают области подготовки землетрясений согласно (Dobrovolsky et al., 1979)

Временные ряды аномалий температуры в UTLS

Расположение аномальных областей в обоих случаях находились в пределах координат: 33,0–34,0 °N; 77,5–78,75 °E. Показаны вариации температуры над этим участком с июля 2015 г. по февраль 2016 г. на уровнях 300 и 100 гПа характеризовались значительной временной изменчивостью.

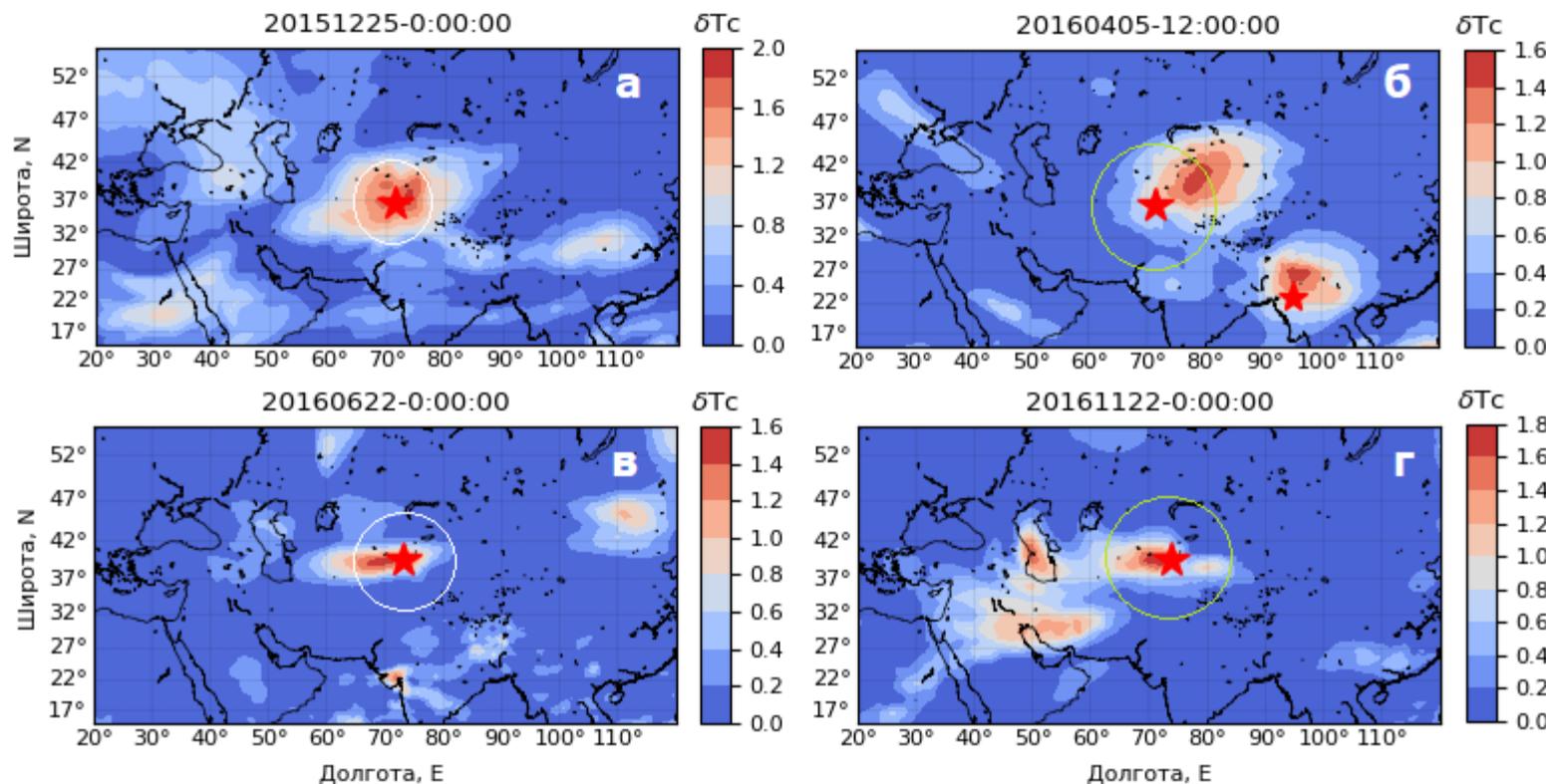
В результате обработки данных с использованием разработанного алгоритма были обнаружены возмущения температуры, которые характеризовались значительным увеличением отношения $R=VAR_{STA}/VAR_{LTA}>1,0$, синхронно проявляющимся на обоих уровнях. Динамика изменения параметров δT_C (δT), отчетливо демонстрирует наиболее интенсивные возмущения температуры ($\delta T_C>3,0$), которые наблюдались за несколько суток до активизации сейсмичности, но **отсутствовали** во все другие моменты времени исследуемого периода.



Динамика изменения температуры (а), отношения скользящих дисперсий ($R=VAR_{STA}/VAR_{LTA}>1,0$) на уровнях 100 гПа и 300 гПа (б), параметров δT и δT_C (в) и последовательности магнитуд (M) и числа землетрясений (N) (г) в июле 2015–феврале 2016 г. (33–34 °N; 77,5–78,75 °E). Маркерами отмечены моменты землетрясений $M>7,0$

Предсейсмические возмущения температуры

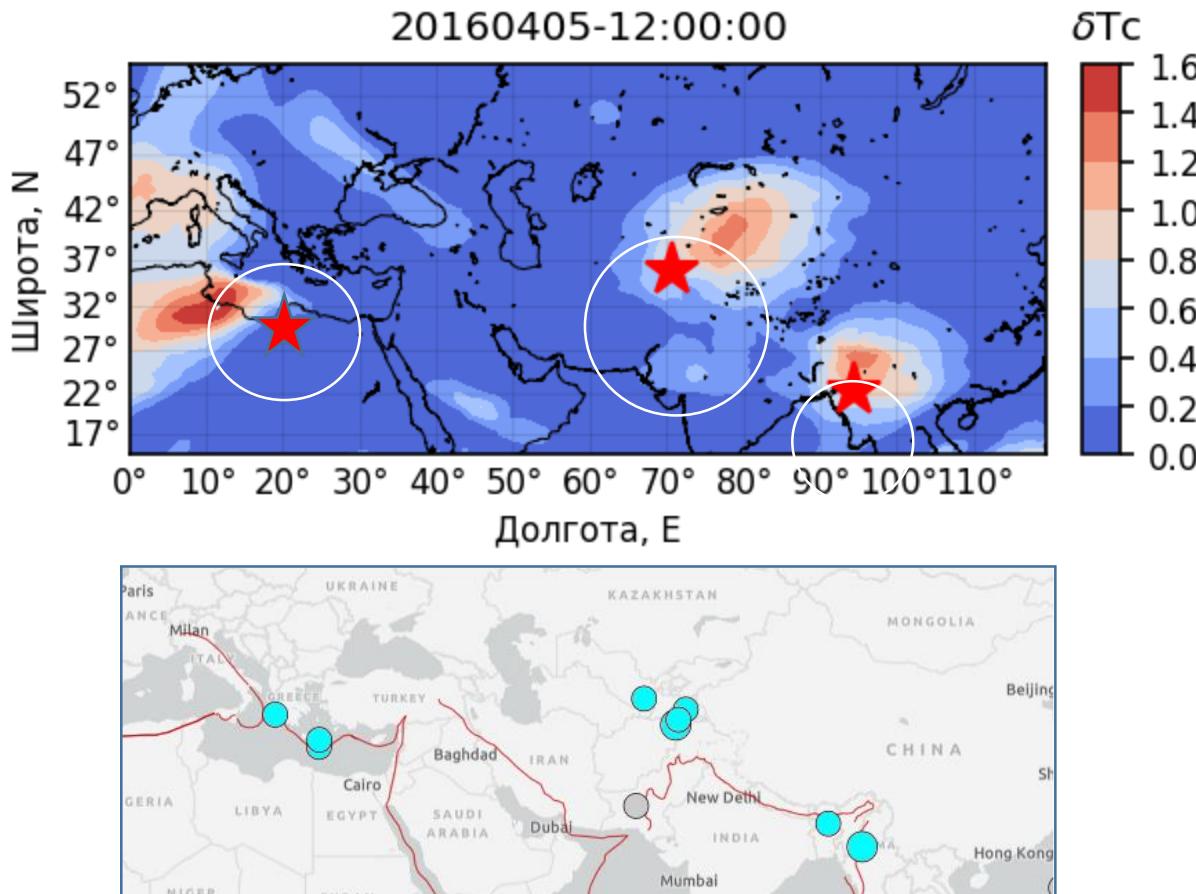
Предсейсмические возмущения температуры для остальных четырех землетрясений также коррелировали со временем возникновения этих событий и концентрировались в пределах области с радиусом Добровольского. Следует отметить сопоставимые по продолжительности (1–2 суток) и интенсивности возмущения ($\delta T_C=1,6\text{--}2,0$). Второй максимум параметра δT_C (23–27° с.ш. и 93–98° в.д.) на (рис. б) совпадал с эпицентральными областями землетрясений, которые произошли в Индии 05 апреля 2016 г. ($M=5,0$; 25,76° с.ш.; 90,55° в.д.) и в Мьянме 13 апреля 2016 г. ($M=6,9$; 23,09° с.ш.; 94,87° в.д.).



Пространственное распределение параметра δT_C 25 декабря 2015 г. (а), 05 апреля 2016 г. (б), 22 июня 2016 г. (в) и 22 ноября 2016 г. (г). Маркерами показаны эпицентры землетрясений: в Афганистане $M=6,3$ (25.12.2015; 36,49° с.ш.; 71,13° в.д.) и $M=6,6$ (10.04.2016; 36,47° с.ш.; 71,13° в.д.), Кыргызстане $M=6,4$ (26.06.2016; 39,48° с.ш.; 73,34° в.д.), Таджикистане $M=6,6$ (25.11.2016; 39,27° с.ш.; 73,98° в.д.)

Предсейсмические возмущения температуры

Расширив исследуемую область, можно обнаружить третий максимум в пространственном распределении интегрального параметра δT_C , который совпадает с зоной подготовки землетрясений в Греции 29 марта и 05 апреля 2016 г. ($M=5.4$; 34.19° с.ш.; 25.73° в.д.).

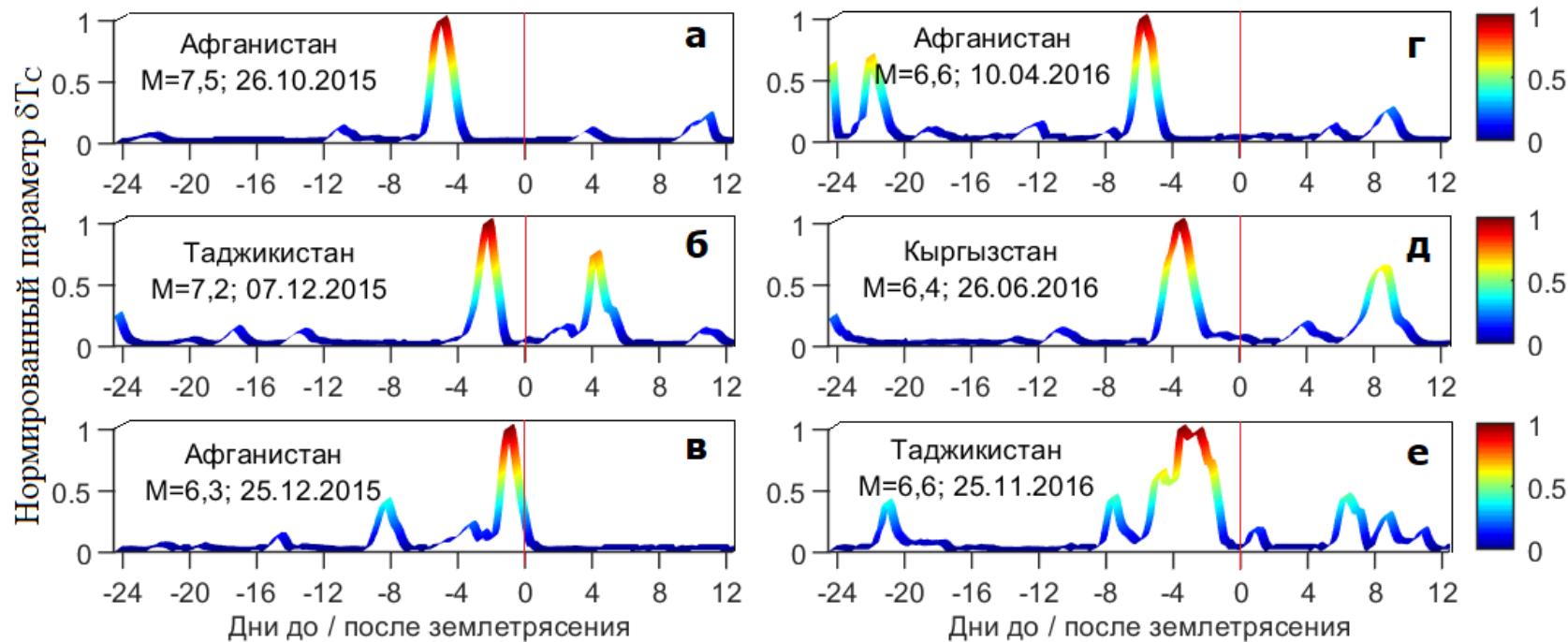


Пространственное распределение параметра δT_C 05 апреля 2016 г. перед землетрясением в Афганистане $M=6.6$ (10.04.2016; 36.47° с.ш.; 71.13° в.д.), событиями в Индии 05 апреля 2016 г. ($M=5.0$; 25.76° с.ш.; 90.55° в.д.) и в Мьянме 13 апреля 2016 г. ($M=6.9$; 23.09° с.ш.; 94.87° в.д.) и Греции 29 марта и 05 апреля 2016 г. ($M=5.4$; 34.19° с.ш.; 25.73° в.д.) (а). Расположение эпицентров землетрясений $M>5.0$ в марте – апреле 2016 г. (б) по данным <https://earthquake.usgs.gov>

Результаты диагностирования возмущений температуры в UTLS

Приведены 36-дневные (~24 дня до и 12 дней после событий) фрагменты графиков нормированного параметра δT_C , которые демонстрируют наличие передсейсмических аномалий температуры. Наиболее интенсивные тепловые аномалии наблюдались за 1–6 дней до событий.

Синхронизация температурных аномалий и землетрясений полностью соответствует критериям DTS–Т и позволяет предположить единую природу формирования тепловых аномалий и общность протекающих при этом физических процессов. Определенное различие во времени запаздывания сейсмических событий относительно появления тепловых аномалий, а также размеров возмущенных областей может быть связано с существенно различающимися глубинами гипоцентров.



Результаты диагностирования аномалий температуры в UTLS (нормированный параметр δT_C) перед сейсмическими событиями $M>6,0$ в 2015–2016 гг., приведенные к одному моменту землетрясения (отмечен красной линией)

Выходы

Представлены результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере в периоды подготовки 6 крупных землетрясений с магнитудами $M > 6,0$ в сейсмически активном регионе Центральной Азии (Афганистан, Таджикистан и Кыргызстан). Для анализа использовался набор данных реанализа MERRA-2. В качестве предсейсмических признаков в поведении температуры, рассматривались пространственно согласованные противоположные по знаку аномальные короткопериодные изменения температуры, происходящие в верхней тропосфере и области тропопаузы. Результаты спутникового мониторинга температурного режима в исследуемом регионе и последующего вычисления параметров аномальных вариаций показали, что устойчивые в пространстве и времени мезомасштабные возмущения температуры отчетливо наблюдались за 1–5 суток до событий. Согласно полученным данным, важным параметром, влияющим на возмущения температуры в UTLS, является глубина очага землетрясения. Пространственный масштаб тепловых аномалий, предшествующих глубокофокусным землетрясениям ($D > 200$ км), значительно превышал размеры аномалий малоглубинных событий. В тоже время выделенные во всех анализируемых случаях возмущения температуры располагались в пределах областей, рассчитанных с использованием радиуса Добровольского, и могут, вероятно, служить проявлением реакции слоев нижней атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке сильных землетрясений. Отклонения предсейсмических аномалий в пространстве и времени соответствовали критериям DTS-T.

Литература

1. Свердлик Л.Г. Динамика тепловых аномалий в сейсмически активном регионе Центральной Азии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025 (в печати).
2. Свердлик Л.Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
3. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Пространственно-временное распределение возмущений в атмосфере перед сильными землетрясениями в Тянь-Шане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 114–122.
4. Sverdlik L., Imashev S. Spatial-temporal distribution of atmospheric temperature anomalies connected with seismic activity in Tien-Shan // MAUSAM. 2020. Vol. 71. № 3. P. 481-490.

Спасибо за внимание!

