

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КРИТЕРИЯ STA/LTA ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРИОДЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ

**Свердлик Л.Г.** ([l.sverdlik@mail.ru](mailto:l.sverdlik@mail.ru))

Научная Станция РАН в г. Бишкеке



19 Конференция

«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»

Институт Космических Исследований РАН,

Москва, 15-19 ноября, 2021

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

Идентификация возмущений температуры 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>):

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

где:  $t_i$  - время текущей выборки (или отсчет) временного ряда температуры на изобарическом уровне  $p_k$ ;  $N_S$  - длина короткого (STA) временного окна;  $N_L$  - размер длинного (LTA) окна;  $CF(t_i)$  - значение характеристической функции, соответствующее моменту времени  $t_i$  и порог обнаружения  $THR$ .

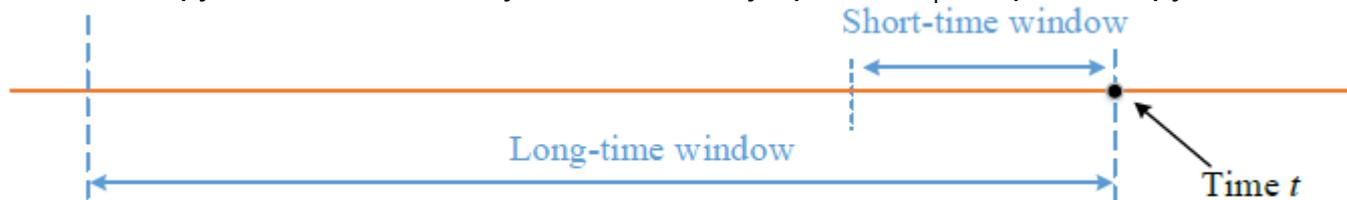


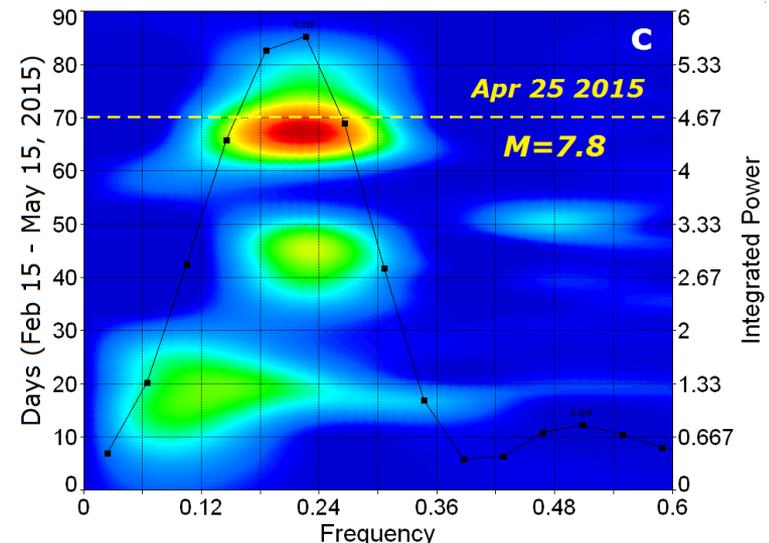
Figure 1 The relative positions of the long-time window and the short-time window.

Использовался подход, основанный на выделении противофазных аномальных вариаций, период которых составляет 5–6 суток. Соответственно, значения характеристических функций в коротком окне ( $VAR_{STA}$ ) описывали локальные изменения температуры, которые произошли в предыдущие 2.5–3.0 суток.

Характеристические функции в длинном окне ( $VAR_{LTA}$ ) рассчитывались по значениям температуры за предшествующие 15 суток.

Соотношение между размерами окон:  $N_L/N_S \sim 5$ .

Вейвлет-диаграмма и спектр мощности временного ряда нормированных аномалий температуры с 15 февраля по 15 мая 2015 г. перед землетрясением в Непале  $M=7.8$



# Алгоритм обработки данных спутниковых измерений

Типичные варианты характеристических функций CF ( $y_t = g(x_t)$ ): энергия ( $y_t = x_t^2$ ) (McEilly & Majer, 1982), абсолютное значение ( $y_t = |x_t|$ ) (Swindell & Snell, 1977), среднеквадратичное отклонение и огибающая функция ( $y_t = \sqrt{x_t^2 + h(x_t)^2}$ , где  $h$  обозначает преобразование Гильберта) (Earle & Shearer, 1994). На основании сопоставления данных о сейсмической активности с особенностями изменения температуры в области UTLS был сделан выбор в пользу применения дисперсии (VAR).

$$CF(T(t_i, p_k)) = VAR(T(t_i, p_k)) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (T(t_i, p_k) - \langle T(p_k) \rangle)^2$$

Выделение возмущений температуры проводилось на основе вычисления показателя аномальности  $\delta T(t_i)$ , равного произведению двух отношений:

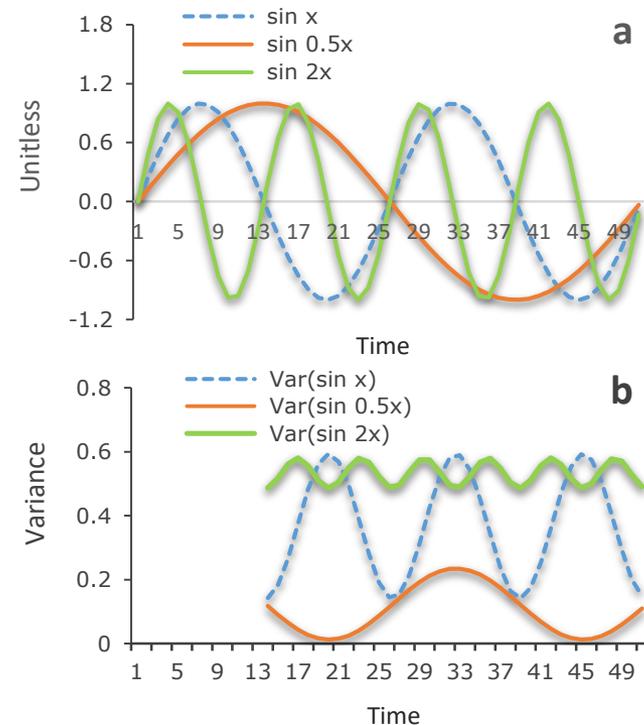
$$R(t_i) = VAR_{STA}(t_i) / VAR_{LTA}(t_i),$$

рассчитанных для временных рядов температуры в верхней тропосфере ( $P_{UT}$ ) и нижней стратосфере ( $P_{LS}$ ). Двухпараметрический алгоритм более устойчив к воздействию различных несейсмических факторов.

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

Для минимизации вероятности формирования ложных (синфазных) аномалий параметр  $\delta T(t_i)$  вычислялся с учетом коэффициента корреляции  $r(t_i)$  между изменениями температуры на рассматриваемых изобарических уровнях в каждом коротком временном окне (STA):

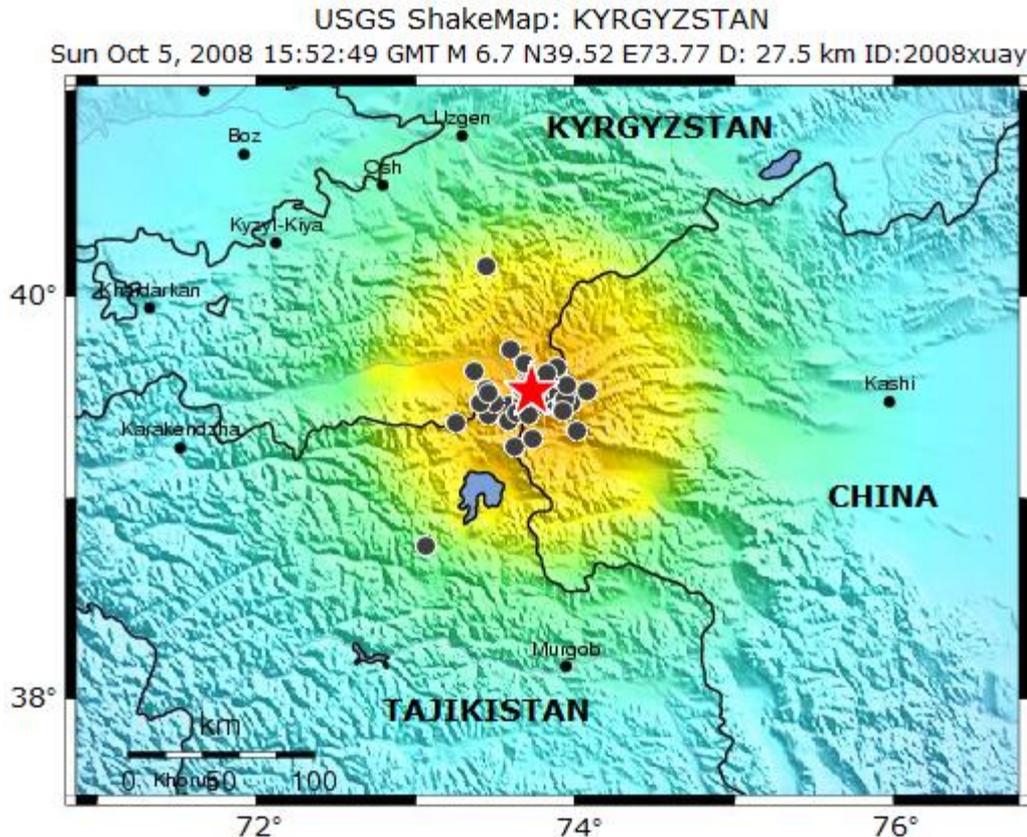
$$\delta T_C(t_i) = \begin{cases} 0,00 \text{ - если } r(t_i)_{STA} \geq 0 \\ \delta T(t_i) \times |r(t_i)_{STA}| \text{ - если } r(t_i)_{STA} < 0 \end{cases}$$



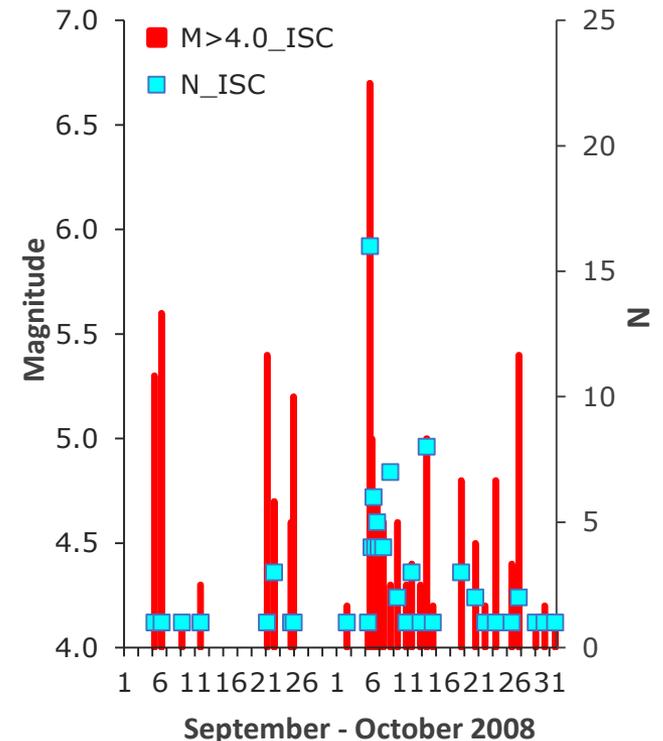
Моделирование процесса формирования аномалий температуры. Пример модельных сигналов (а) и соответствующих скользящих дисперсий (b)

# Данные сейсмических измерений

Разрушительное Нуринское землетрясение с магнитудой  $M=6.7$  ( $39,52^\circ\text{N}$ ;  $73,77^\circ\text{E}$ ) произошло 05 октября 2008 года (15:52:49 UT) на глубине примерно 27.5 км (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>). Всего в течение дня было зарегистрировано более 50 афтершоков с магнитудами  $M \geq 3.0$  вблизи эпицентра главного землетрясения. Сотрясениями была охвачена территория, включающая приграничные районы Кыргызстана, Таджикистана и Китая.



Афтершоковое поле землетрясения  $M=6.7$  (05.10.2008 г.)  
(<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/usp000gjd4/shakemap/intensity>)

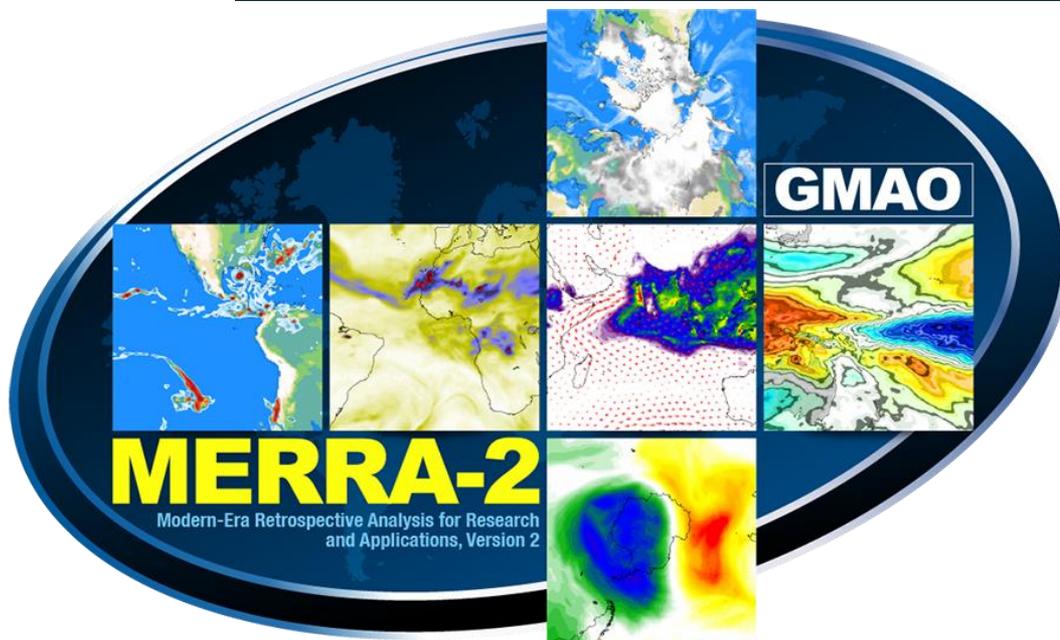


Распределение магнитуд ( $M \geq 4.0$ ) и числа сейсмических событий  $N$  в сентябре-октябре 2008 года

# Данные спутниковых измерений температуры (реанализ MERRA-2)

MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications)

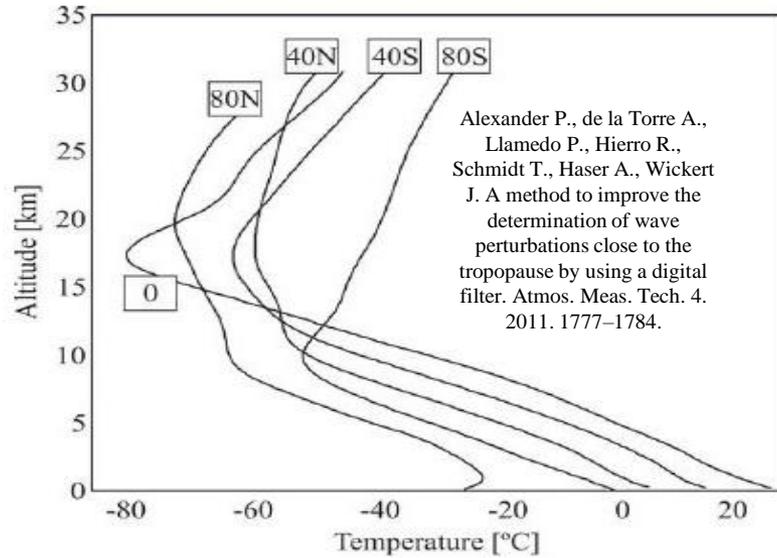
[\(https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/\)](https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/)



## Анализируемые данные T(t):

- 12 стандартных изобарических уровней давления от 500 до 40 гПа;
- диапазон высот ~5.0-24.0 км;
- пространственное разрешение  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ ;
- исследуемая область  $35\text{--}50^\circ$  с.ш. и  $60\text{--}90^\circ$  в.д.;
- дискретизация по времени  $\Delta t = 3$  ч.;
- январь–декабрь 2008 г.

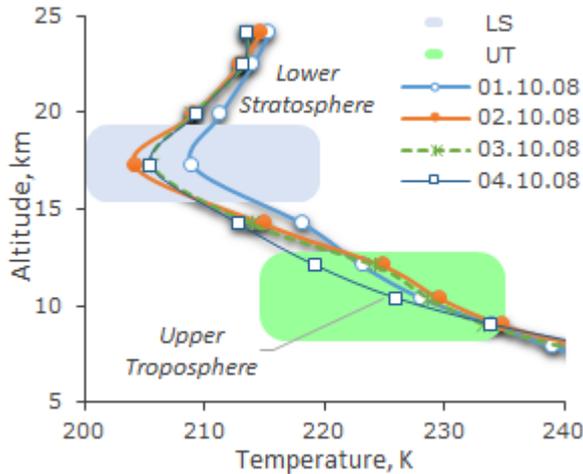
# Выбор высотных диапазонов для проведения расчетов STA/LTA



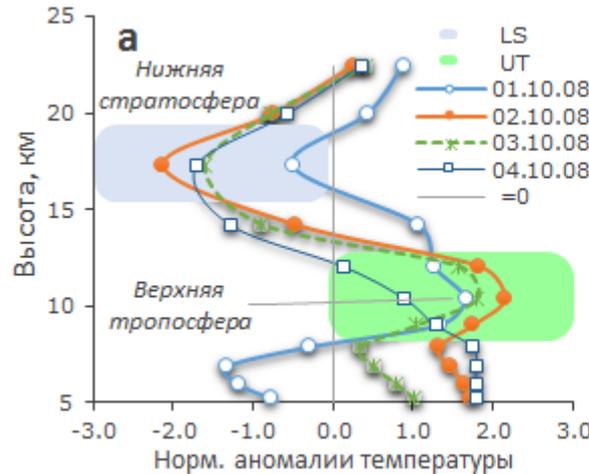
Определение наиболее информативных уровней в области UTLS для конкретного расположения эпицентра землетрясения с учетом особенностей динамики вертикальной структуры температуры.

*Профили средней температуры в низких, средних и высоких широтах, усредненные по зонам от 80° с.ш. до 80° ю.ш. в течение января 2007 г.*

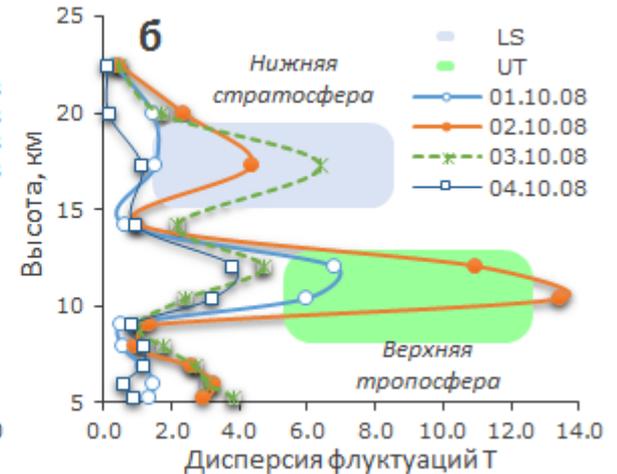
(Alexander P., de la Torre A., Llamedo P., Hierro R., Schmidt T., Haser A., Wickert J. A method to improve the determination of wave perturbations close to the tropopause by using a digital filter. Atmos. Meas. Tech. 4. 2011. 1777–1784).



Результаты спутниковых измерений вертикального распределения температуры с 01 по 04 октября 2008 г. (для 00:00 UT)

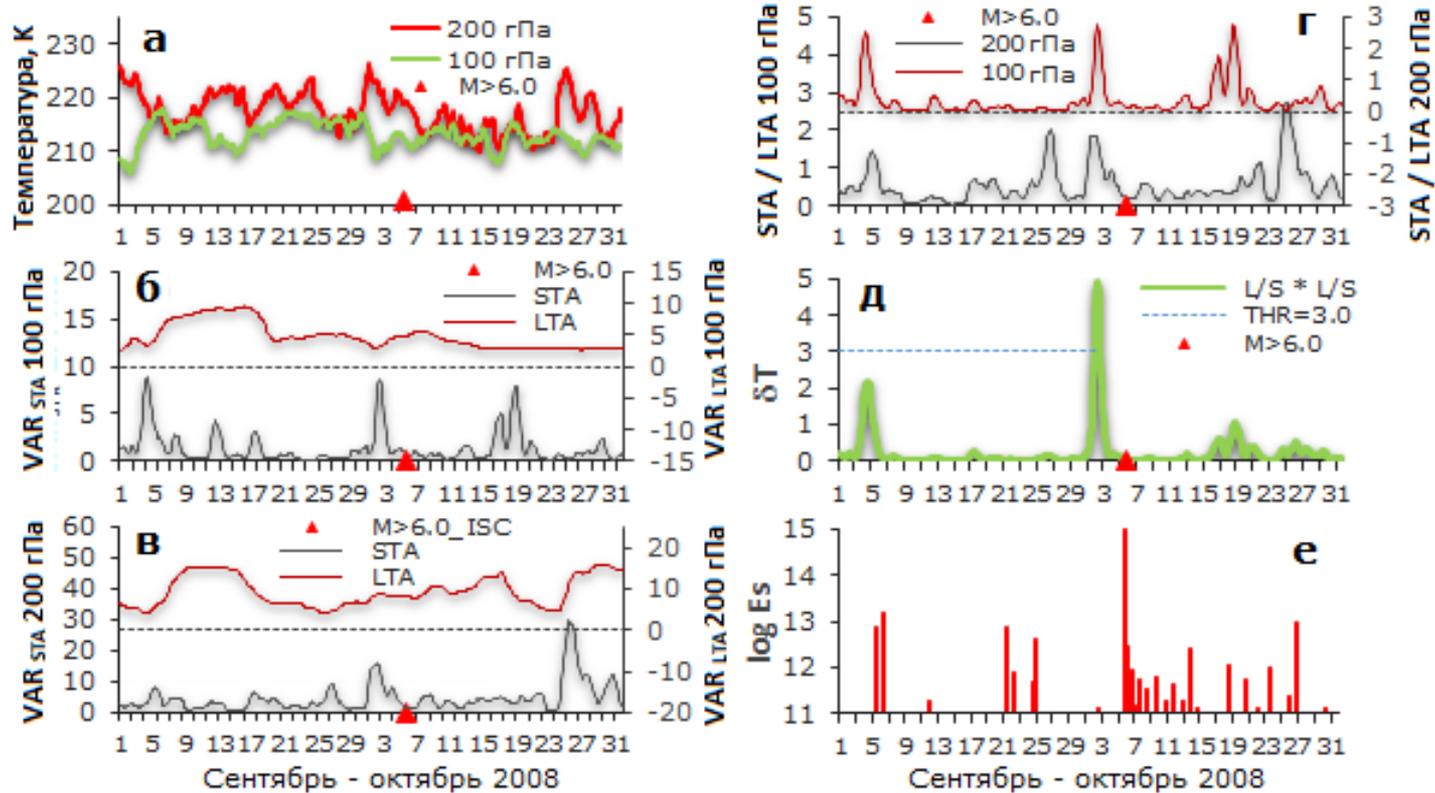


Высотные профили нормированных аномалий (а) и дисперсий ( $VAR_{STA}$ ) флуктуаций (б) температуры в диапазоне высот 5.0–25.0 км над эпицентральной областью (73.125–75.0 °E; 38.5–40.5 °N) Нуринского землетрясения  $M=6.7$  с 01 по 04 октября 2008 г. (для 00:00 UT)



# Результаты идентификации возмущений температуры

Представлены все этапы процесса детектирования предсейсмических возмущений температуры в UTLS (200 гПа и 100 гПа) в период с 01 сентября по 31 октября 2008 г. Аномалии температуры в области тропопаузы отчетливо проявлялось 05 сентября и 02–03 октября 2008 г. Как видно, наиболее интенсивные возмущения температуры в UTLS наблюдались примерно за 2–3 дня до землетрясения  $M=6.7$ . Во все другие моменты времени исследуемого периода такого эффекта не наблюдалось.

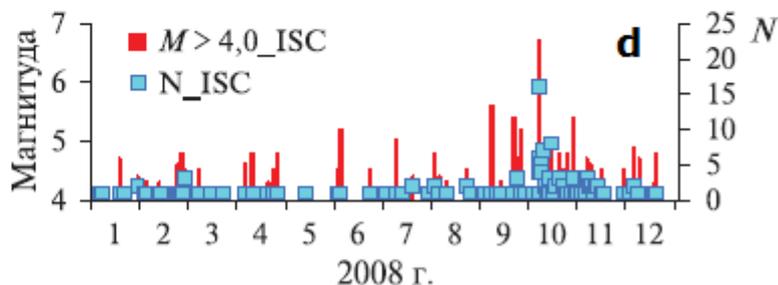
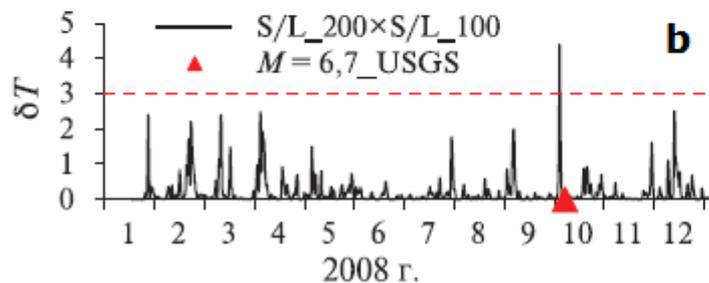
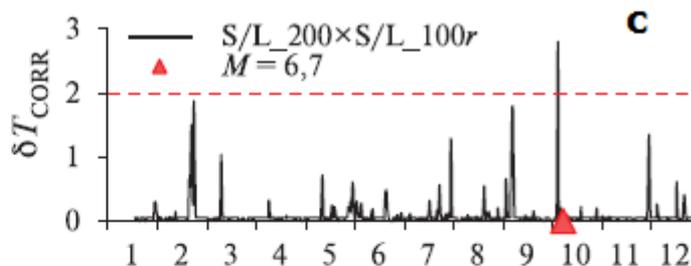
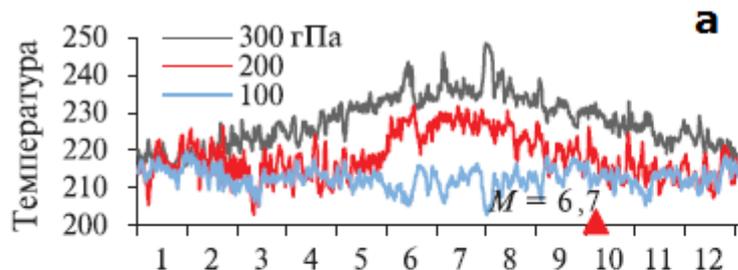


Исходные временные ряды температуры (а); скользящие дисперсии  $VAR_{STA}$  и  $VAR_{LTA}$  на уровнях 100 гПа (б) и 200 гПа (в); соответствующие отношения дисперсий  $STA/LTA$  (г) и их произведение ( $\delta T$ ) (д) в точке с координатами  $73.125^\circ E$  и  $43.0^\circ N$  (маркерами отмечен момент землетрясения  $M=6.7$ ); распределение логарифма сейсмической энергии ( $\log E_s$ ) (е) в период с 01 сентября по 31 октября 2008 г.

# Результаты идентификации возмущений температуры

Аномальное изменение температуры, предвещающее основное сейсмическое событие, четко выделялось после применения алгоритма STA/LTA на фоне более слабых возмущений при обработке спутниковых данных с января по декабрь 2008 г.

Показаны также различия в работе алгоритма, реализованного в соответствии с формулами для расчета  $\delta T$  и  $\delta T_C$ . Использование параметра  $\delta T_C$  позволяет в значительной степени ослабить синфазные возмущения температуры в UTLS (например, в феврале-апреле).

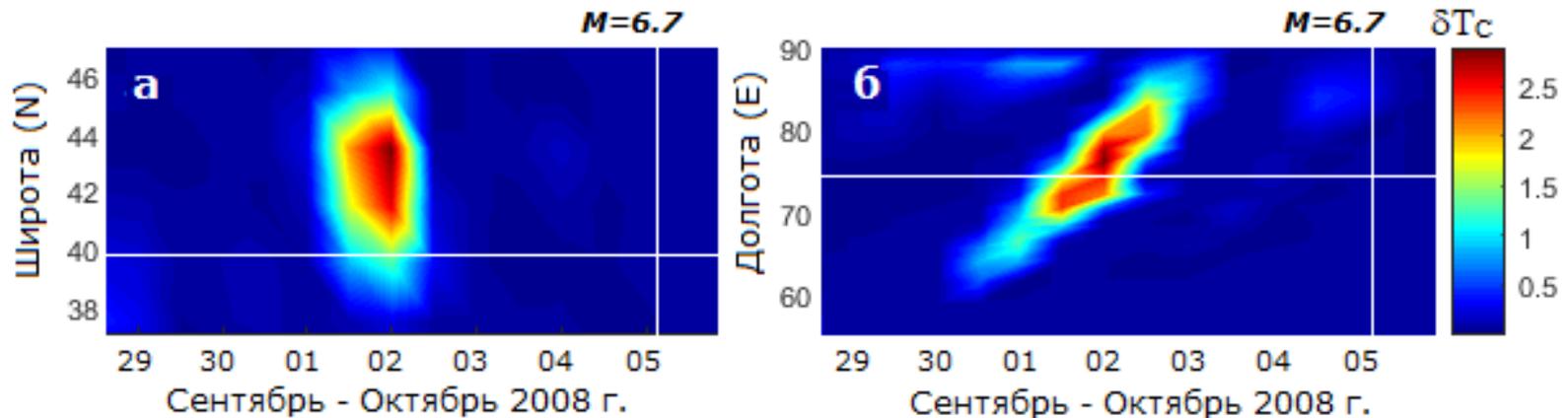


Вариации температуры на изобарических уровнях 300, 200 и 100 гПа (a), изменения параметров  $\delta T$  (b) и  $\delta T_C$  (c), распределение магнитуд ( $M \geq 4,0$ ) и числа сейсмических событий  $N$  (d) в 2008 году

# Пространственно-временное распределение возмущения температуры (землетрясение $M=6.7$ ; 05 октября 2008 г.)

Два поперечных сечения изменчивости  $\delta T_C$  в период с 29 сентября по 05 октября 2008 г. позволяют оценить местоположение и размеры аномальных областей, их эволюцию во времени, а также определить время наибольших значений параметра  $\delta T_C$ .

Возмущение в UTLS наблюдалось в период с 01 по 03 октября 2008 г. Аномальная область начала формироваться 01 октября в 09:00 UT западнее эпицентра, а затем переместилась вдоль широты 43 °N на восток и достигла максимума 02 октября 2008 г. за 3 дня до землетрясения. Наиболее высокие значения  $\delta T_C=2.79$  и  $\delta T_C=2.83$ , превышающие  $THR=2.0$ , наблюдались в 03:00 и 06:00 UT, соответственно.



Распределения параметра  $\delta T_C$  по широте (а) и долготе (б) с 29 сентября по 05 октября 2008 г. Вертикальные линии указывают момент землетрясения (2008-10-05; 15:52:49 UT).

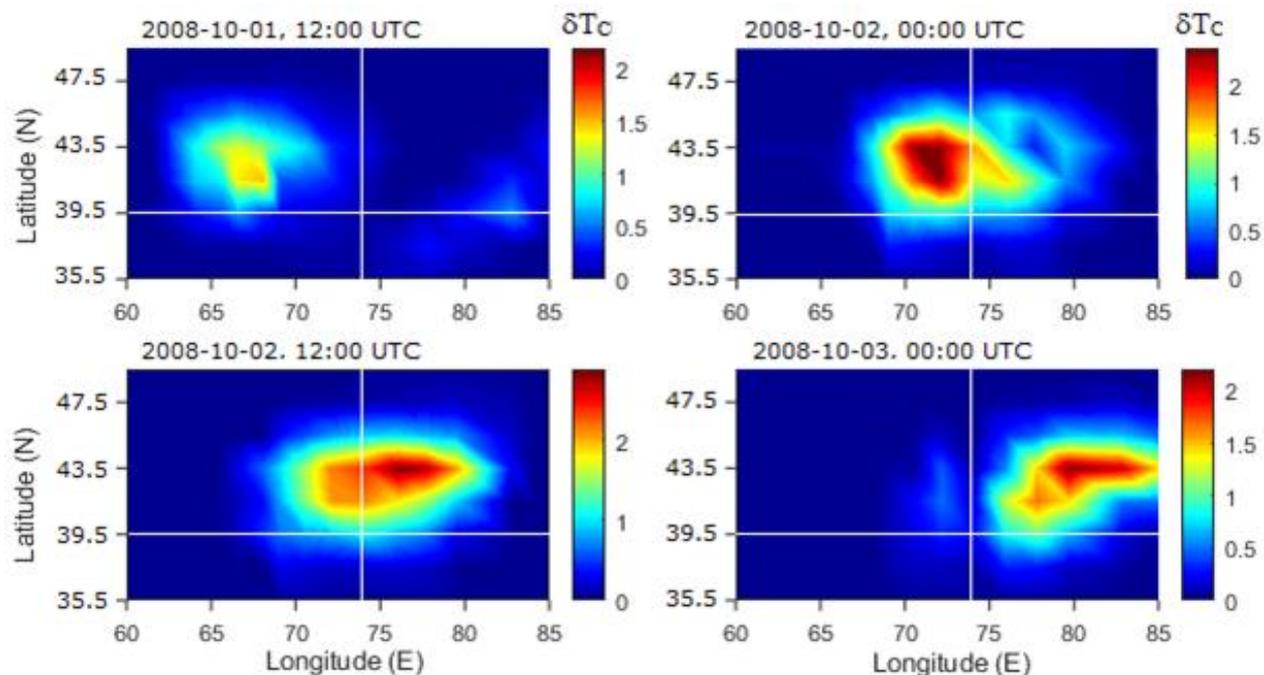
Горизонтальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения.

Красным цветом выделены области, в которых значения интегрального параметра аномальных вариаций превышали пороговый уровень:  $\delta T_C \geq THR \geq 2.0$

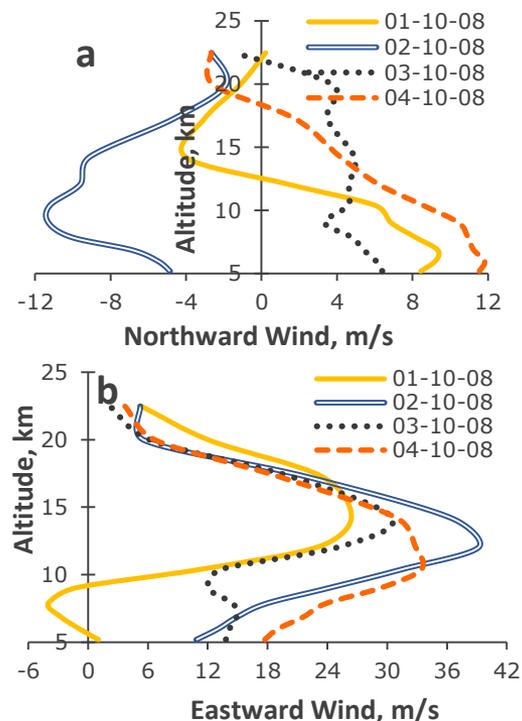
# Пространственно-временное распределение возмущения температуры (землетрясение $M=6.7$ ; 05 октября 2008 г.)

Мезомасштабная область аномально высоких значений  $\delta T_C$  располагалась в пределах координат 40–44 °N. Максимум температурного возмущения смещен на  $\sim 2\text{--}3^\circ$  в северо-западном направлении (в 00:00 UT) и на  $\sim 2\text{--}4^\circ$  в северо-восточном направлении (в 12:00 UT) относительно эпицентра землетрясения.

Наблюдаемый эффект смещения возмущения температуры можно связать с преобладающими на рассматриваемых высотах в атмосфере горизонтальными течениями воздуха.



Эволюция пространственного распределения параметра  $\delta T_C$  в период с 01 октября 2008 г. (12:00 UT) по 03 октября 2008 г. (00:00 UT). Горизонтальные и вертикальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения  $M=6.7$  ( $39.52^\circ\text{N}$ ;  $73.77^\circ\text{E}$ )



Профили северной (a) и восточной (b) компонент скорости ветра с 01 по 04 октября 2008 г.

Результаты свидетельствуют о вероятной связи между сейсмической активностью и локальным возмущением температуры в UTLS, устойчиво наблюдающимся в течение 36 часов вблизи эпицентра землетрясения.

## Выводы

Таким образом, представленный алгоритм, основанный на использовании модифицированного критерия STA/LTA, обладает достаточно высокой чувствительностью для выделения возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере, связанных с крупными землетрясениями. Очевидным преимуществом алгоритма является простота, эффективность, отсутствие необходимости в дополнительных преобразованиях исходных температурных данных и удобство использования для прогнозных целей.

Полученные результаты отражают динамику области аномальных изменений температуры, синхронизированную как по времени, так и в пространстве с сейсмическим процессом и с периодом подготовки рассматриваемого землетрясения  $M=6.7$  и свидетельствуют о вероятной связи между сейсмической активностью и локальным возмущением температуры в UTLS, устойчиво наблюдающимся в течение 36 часов вблизи эпицентра землетрясения

Предсейсмические возмущения температуры в UTLS были идентифицированы с помощью разработанного алгоритма и в нескольких других проанализированных случаях сильных землетрясений ( $M \geq 5.0$ ) на территории Тянь-Шаня. В тоже время существует необходимость дальнейших исследований атмосферных эффектов землетрясений.

## Литература

1. *Свердлик Л.Г., Имашев С.А.* Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 783–793.
2. *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.
3. *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.
4. *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.



**Спасибо за  
внимание!**

**Thank you for  
attention!**