

# СЕЙСМОГЕННЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ВЕРХНЕЙ ТРОПОСФЕРЕ И НИЖНЕЙ СТРАТОСФЕРЕ

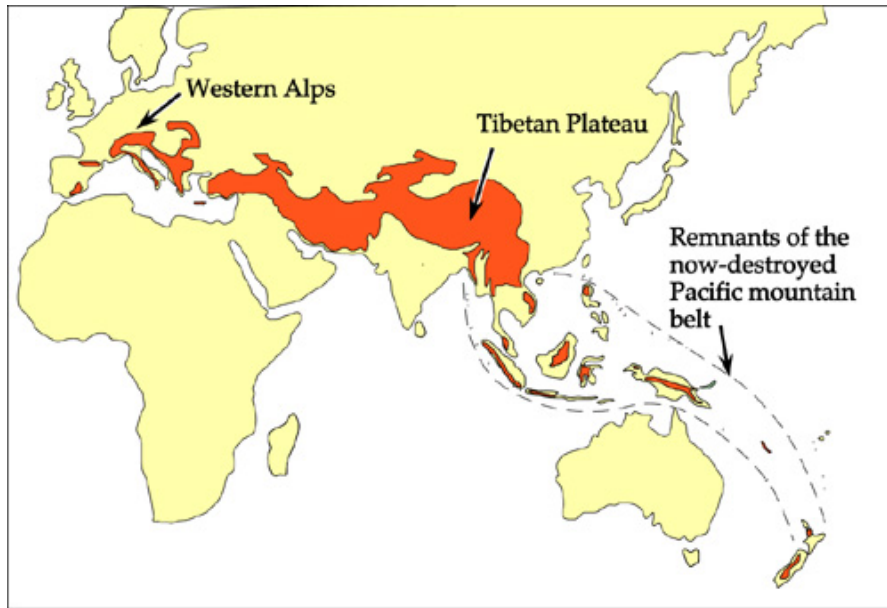
**Свердлик Л.Г.** ([l.sverdlik@mail.ru](mailto:l.sverdlik@mail.ru))

Научная Станция Российской Академии Наук в г. Бишкеке  
Кыргызско-Российский Славянский Университет (КРСУ)



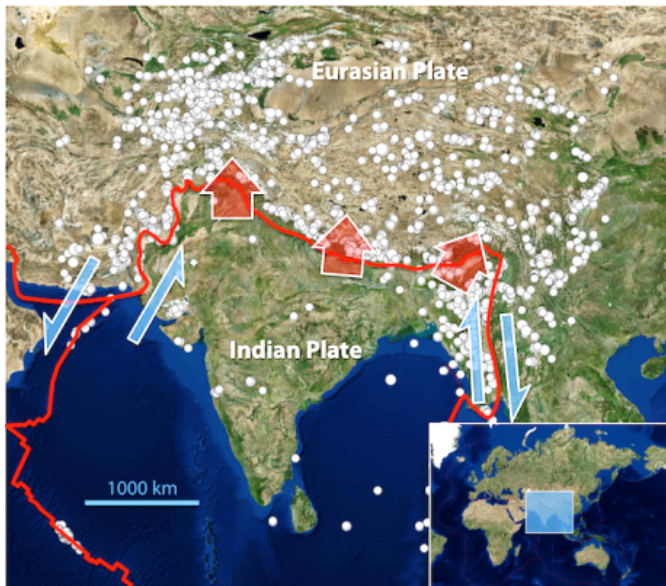
20 Конференция «Современные проблемы дистанционного  
зондирования Земли из космоса»  
Институт Космических Исследований РАН, Москва,  
14-18 ноября, 2022

# ВВЕДЕНИЕ



Эксперименты, проведенные в разных географических регионах с использованием спутниковых данных, подтвердили появление перед сейсмических тепловых эффектов и их потенциальную возможность служить индикатором тектонической активности.

Настоящее исследование направлено на выявление атмосферных возмущений, предшествующих сильным землетрясениям, которое основано на использовании усовершенствованной версии разработанного ранее алгоритма обработки данных спутниковых измерений, предназначенного для установления взаимосвязи между возмущениями в верхней тропосфере / нижней стратосфере (UTLS) и вариациями сейсмичности.



Проанализированы изменения температуры в одном из самых сейсмически активных внутриконтинентальных регионов мира, который является частью Альпийско-Гималайского сейсмического пояса, образованного в процессе столкновения движущихся на север Аравийской и Индийской плит с Евразийской плитой и простирающегося от Европейских Альп через Карпаты, Кавказ, Тянь-Шань, Памир и Гималаи.

## Данные сейсмических измерений

Исследование атмосферных эффектов землетрясений проводилось в одном из самых активных с сейсмической точки зрения внутриконтинентальных регионов мира. Его территория вытянута в субширотном направлении от юго-восточной части Ирана до провинции Сычуань на юго-западе Китая и является частью Альпийско-Гималайского сейсмического пояса. Были проанализированы все крупнейшие землетрясения с магнитудами  $M > 7.5$ , произошедшие в этой области за последние 15 лет (2006–2021 г.): в Китае (2008 г.), Иране, Пакистане (2013 г.) и Непале (2015 г.). Характеристики землетрясений и расположение их эпицентров по данным каталога Геологической службы США (<https://earthquake.usgs.gov>), приведены в табл. и на рис.

Таблица 1. Характеристики землетрясений  $M > 7.5$

№	Дата	Время	Широта (N)	Долгота (E)	D, км	M	Расположение
EQ1	12.05.2008	06:28:01	31.00	103.32	19.0	7.9	E. Sichuan, China
EQ2	16.04.2013	10:44:20	28.03	62.00	80.0	7.7	Saravan, Iran
EQ3	24.09.2013	11:29:47	26.95	65.50	15.0	7.7	Awaran, Pakistan
EQ4	25.04.2015	06:11:25	28.23	84.73	8.2	7.8	Gorkha, Nepal



Расположение эпицентров землетрясений  $M > 7.5$  (<https://earthquake.usgs.gov>)

# 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/>)



NASA National Aeronautics and Space Administration  
Goddard Space Flight Center

GO  
Sciences and Exploration

Global Modeling and Assimilation Office

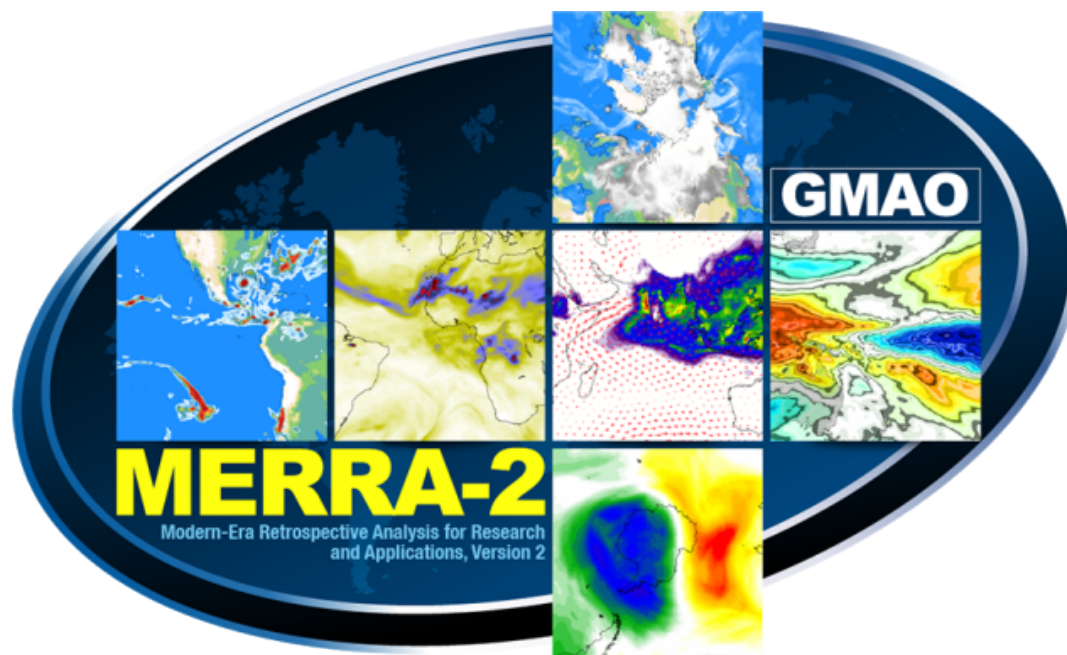
GMAO

WEATHER ANALYSIS & PREDICTION SEASONAL-DECADAL ANALYSIS & PREDICTION REANALYSIS GLOBAL MESOSCALE MODELING OBSERVING SYSTEM SCIENCE

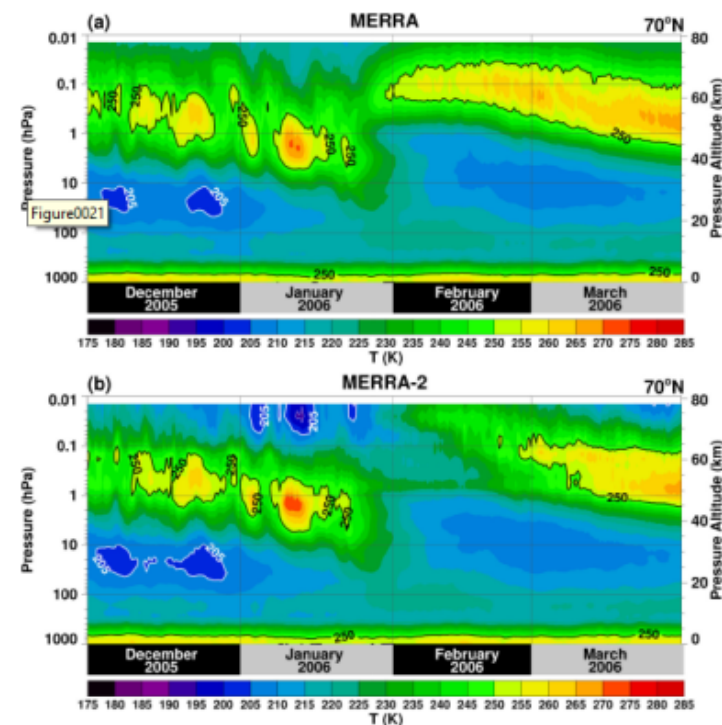
Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

## Анализируемые данные T(t):

- 12 уровней давления;
- от 500 до 40 гПа;
- диапазон высот ~5.0-24.0 км;
- разрешение  $0.5^\circ \times 0.625^\circ$ ;
- $20-50^\circ$  с.ш. и  $40-120^\circ$  в.д.;
- $\Delta t = 3$  ч.;



Высотно-временной разрез средней зональной температуры на  $70^\circ$  с.ш. для (а) MERRA и (б) MERRA-2. Временное разрешение два раза в сутки (00 и 12 UTC) за декабрь 2005 г. – март 2006 г.



Time-altitude section of zonally averaged temperature at  $70^\circ$ N for (a) MERRA and (b) MERRA-2. The time resolution is twice daily (00 and 12 UTC) for December 2005-March 2006. The contour interval is 5 K.

# Алгоритм выделения и идентификации предсейсмических возмущений

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  $THR$ .

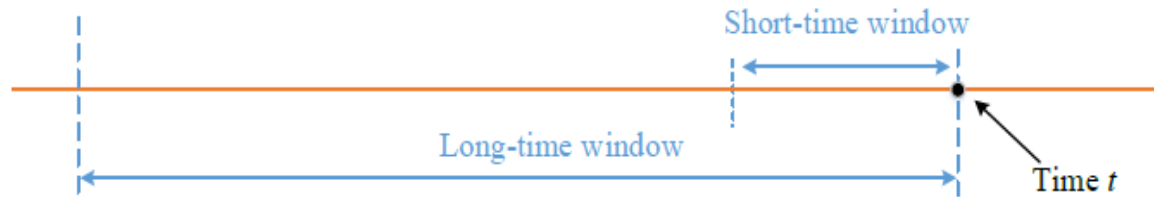


Figure 1 The relative positions of the long-time window and the short-time window.

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

Межсуточные приращения  $\Delta T$ , вычисленные как разность между значениями температуры для одного и того же момента времени, отстоящими друг от друга на определенное количество дней ( $N\delta$ ):

$$\Delta T(t, \delta) = T(t_i) - T(t_{i-\delta}) \quad \text{где: } \delta = m \times \Delta t; m - \text{число отсчетов; } \Delta t = 3 \text{ h} - \text{шаг дискретизации.}$$

Отношения скользящих дисперсий рассчитанных для временных рядов температуры в верхней тропосфере ( $P_{UT}$ ) и нижней стратосфере ( $P_{LS}$ ):

$$R(t_i) = \text{VAR}_{STA}(t_i) / \text{VAR}_{LTA}(t_i)$$

Интегральные параметры аномальных вариаций  $\delta T_C$  ( $\delta T$ ):

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

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

Интерпретация результатов основана на следующих основных положениях:

- возмущенное состояние области UTLS характеризовалось флуктуациями температуры, удовлетворяющими условию:

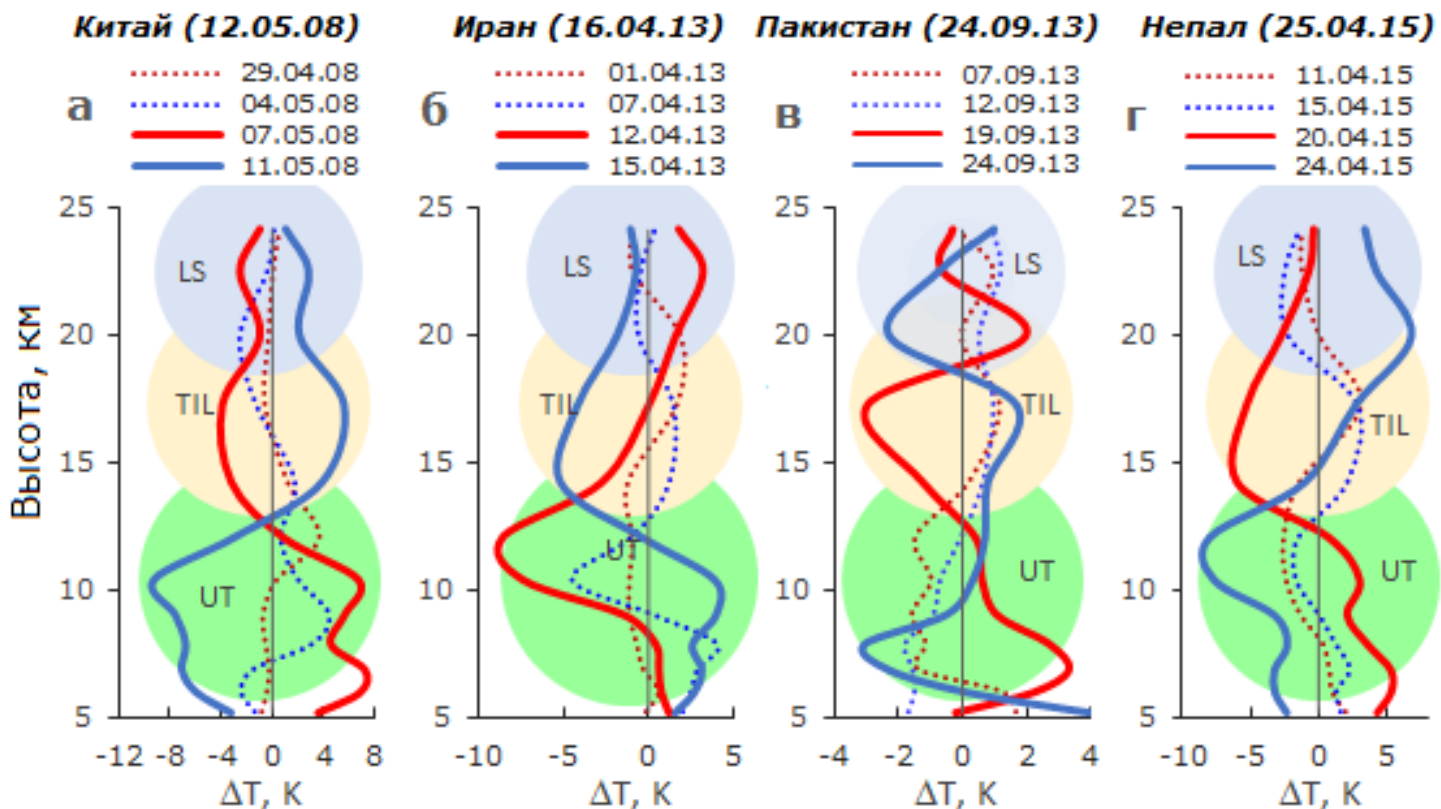
$$\text{VAR}_{STA} \geq \text{VAR}_{LTA} \\ \delta T_C \geq 1.0$$

- аномальными считались значения:

$$\text{VAR}_{STA} \geq (1.5-2.0) \times \text{VAR}_{LTA}$$

# Выбор высотных диапазонов для проведения расчетов STA/LTA

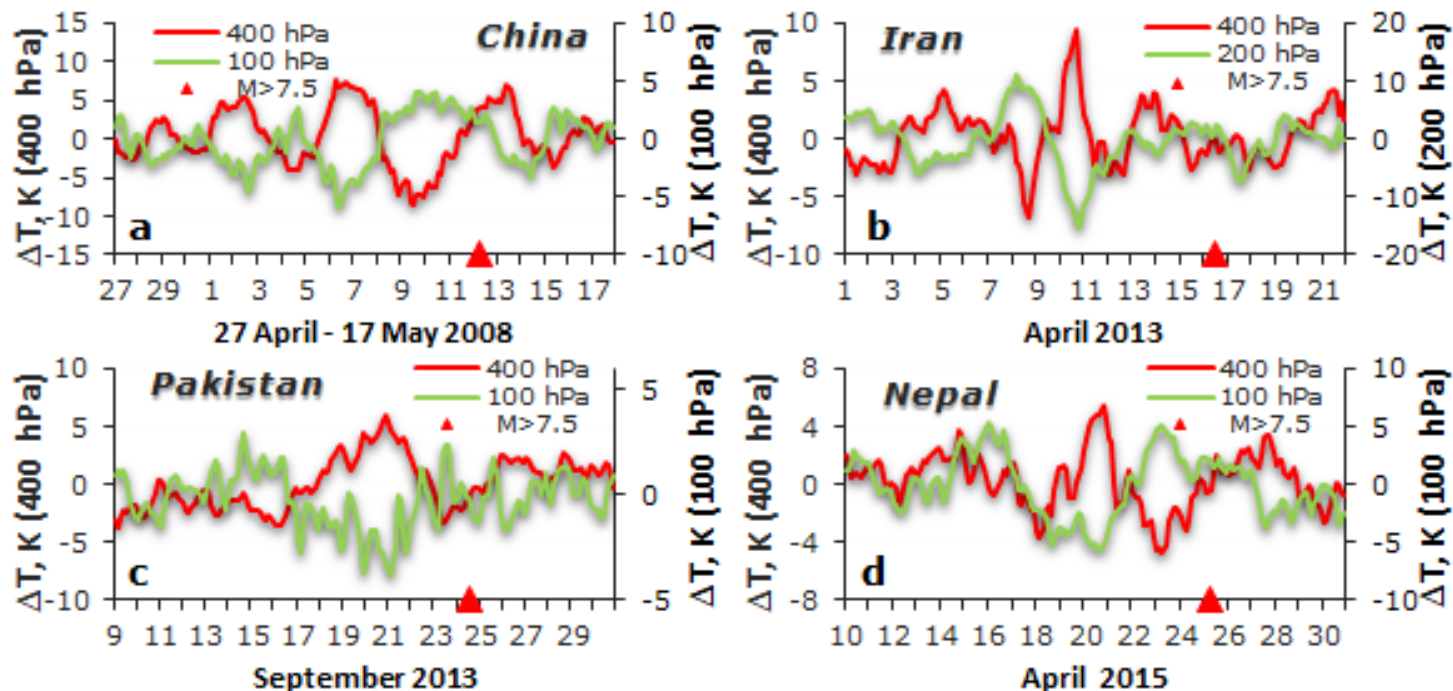
Для исследования предсейсмических изменений вертикальной структуры UTLS и определения высот наиболее возмущенных атмосферных слоев были построены вертикальные распределения приращения температуры  $\Delta T(h)$ , относящиеся к ночному времени суток, а, соответственно, более стабильным условиям атмосферы. На разных стадиях процессов подготовки сейсмических событий вертикальная структура температуры UTLS претерпевала значительные изменения. В тоже время в ее поведении были выявлены некоторые закономерности, отражающие характерные особенности поведения температуры над эпицентрными областями землетрясений EQ1–EQ4.



Трансформация высотных профилей приращений температуры  $\Delta T$  ( $h=5.0-25.0$  км) над эпицентрными областями землетрясений EQ1–EQ4 (00:00 UTC)

## Результаты идентификации возмущений температуры

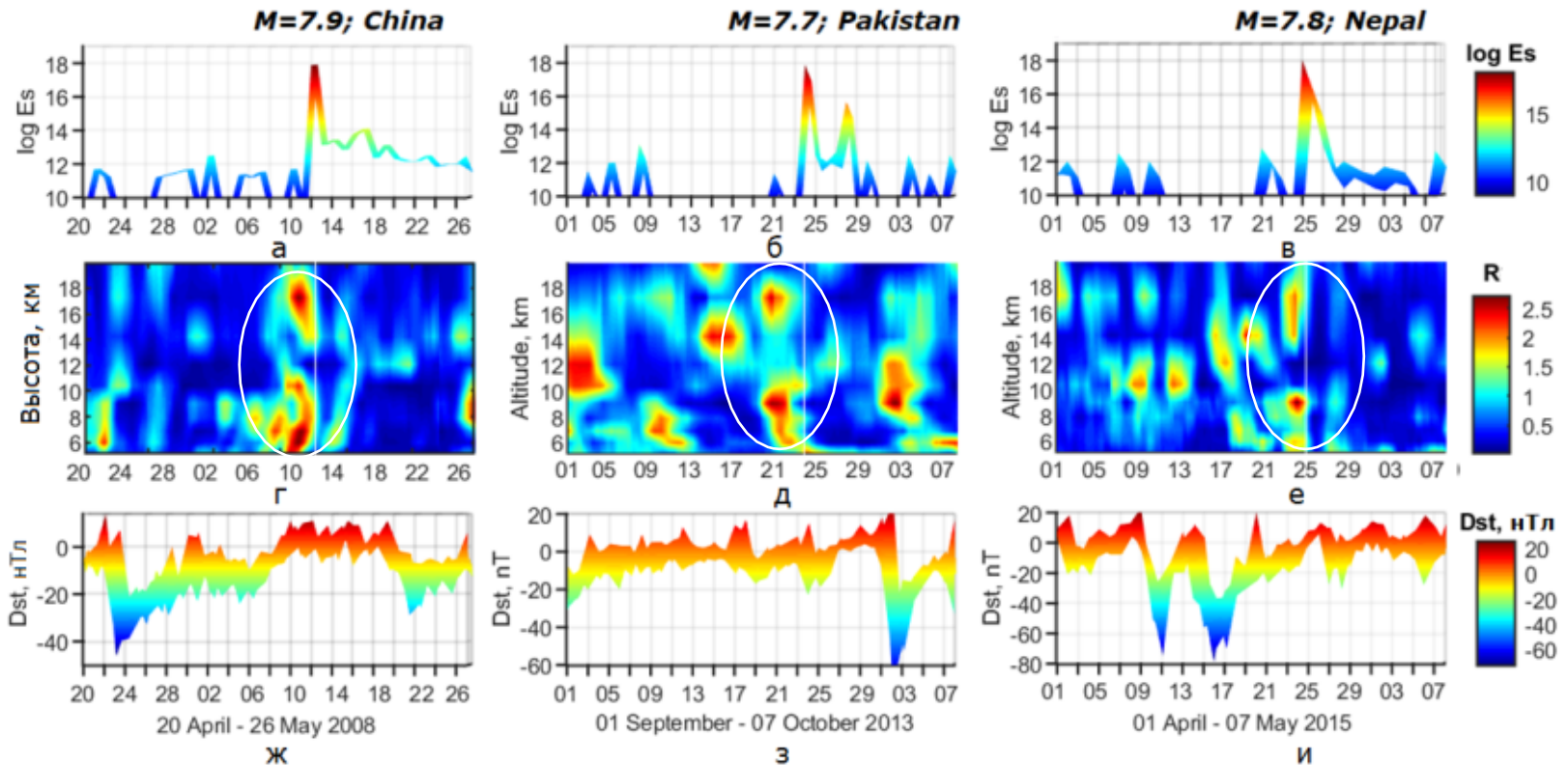
Представлены фрагменты временных рядов приращений температуры  $\Delta T$  на двух уровнях атмосферы: в верхней тропосфере (400 hPa) и области тропопаузы (200 и 100 hPa) в рассматриваемые предсейсмические периоды. Возмущения температуры атмосферы проявлялись в виде синхронных противофазных короткопериодных вариаций. Спектральный анализ подтвердил, что хорошо выраженные интенсивные колебания  $\Delta T$  в диапазоне периодов  $\sim 4\text{--}6$  суток предшествовали сейсмическим событиям. После землетрясений амплитуды колебаний температуры существенно уменьшались, что также может свидетельствовать о вероятной связи наблюдаемых возмущений температуры с сейсмическим процессом.



Вариации приращений температуры  $\Delta T$  в верхней тропосфере (400 hPa) и области тропопаузы (200 и 100 hPa) в периоды сейсмической активности в Китае (a), Иране (b), Пакистане (c) и Непале (d). Маркерами отмечены моменты событий  $M > 7.5$

# Результаты идентификации возмущений температуры

Особенности эволюции вертикальной структуры UTLS над эпицентрными областями землетрясений в Китае, Пакистане и Непале наглядно иллюстрируют высотно-временные распределения отношения  $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$ , совмещенные с графиками изменения логарифма сейсмической ( $\log E_s$ ) и геомагнитной ( $Dst$ ) активности. Приведенные фрагменты показательны, поскольку включают эпизоды как значительной сейсмической, так и умеренно возмущенной геомагнитной активности. Очевидно, что во всех трех случаях наблюдались характерные признаки согласованных предсейсмических изменений  $R$  в области высот  $\sim 9.0$  и  $17.0$  км.

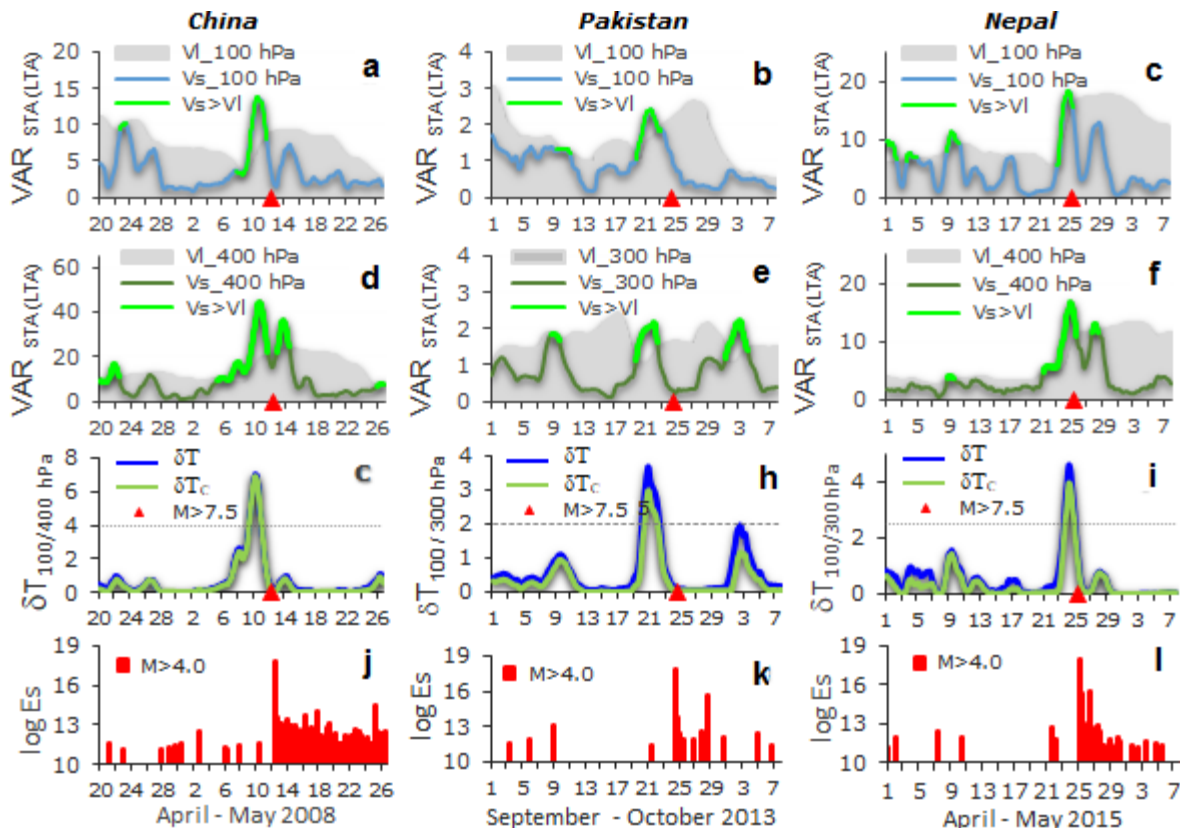


Изменения логарифма сейсмической энергии  $\log E_s$  (а, б, в) и высотно-временное распределение отношения  $R = \text{VAR}_{\text{STA}} / \text{VAR}_{\text{LTA}}$  над эпицентрами землетрясений  $M > 7.5$  в Китае (г), Пакистане (д) и Непале (е); вариации индекса  $Dst$  (ж, з, и) в указанные периоды



## *Выделение возмущений температуры*

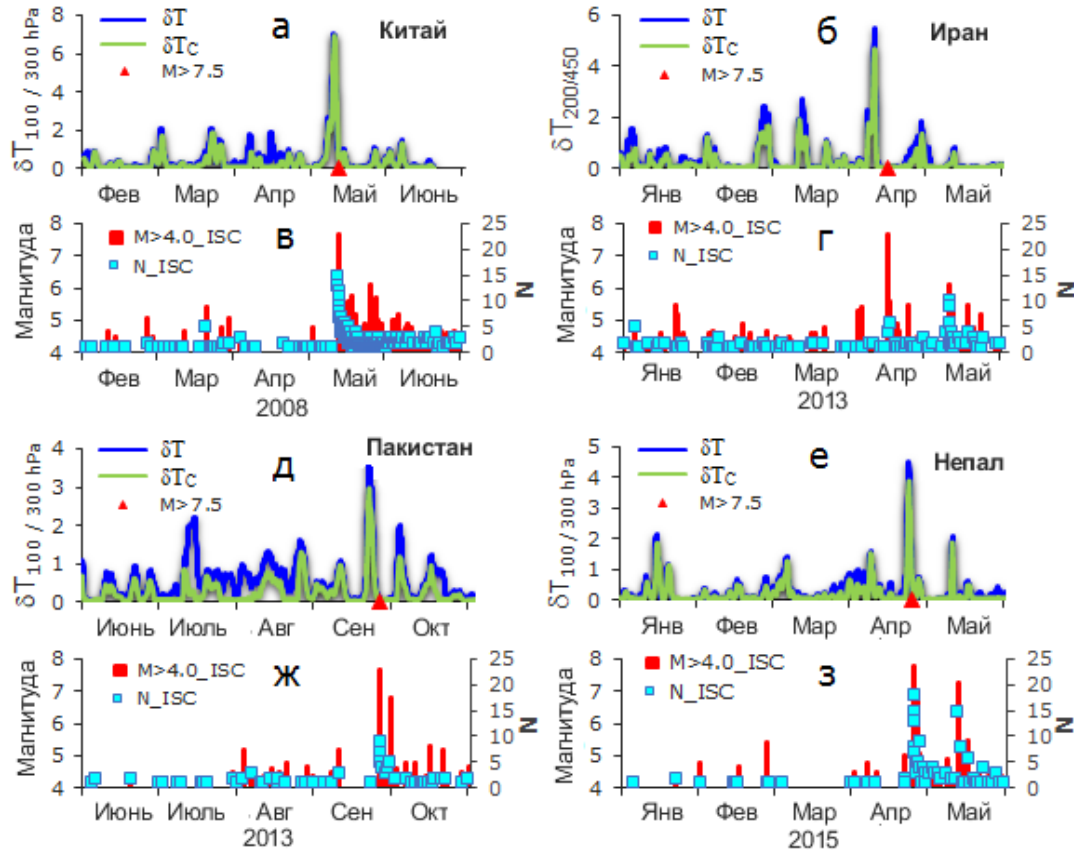
Процесс детектирования предсейсмических возмущений и выделение аномалий температуры на уровнях 300–400 hPa и 100 hPa (рис. а-ф) над эпицентрными областями землетрясений  $M > 7.5$  в Китае, Пакистане и Непале основан на сравнении дисперсий предыдущих значений температуры в коротком и длинном временных окнах. Аномальному поведению температуры соответствовали выделенные зеленым цветом точки графиков, отвечающие условию  $VAR_{STA} > VAR_{LTA}$ .



*Временные ряды скользящих дисперсий  $VAR_{STA}$  и  $VAR_{LTA}$  на уровнях 100 hPa (a, b, c) и 300–400 hPa (d, e, f); соответствующие вариации  $\delta T$  и  $\delta T_C$  (g, h, i) над эпицентрами землетрясений  $M > 7.5$ ; распределение  $\log Es$  (j, k, l) в рассматриваемые периоды в Китае (20 апреля-26 мая 2008 г.), Пакистане (01 сентября-07 октября 2013 г.) и Непале (01 апреля-07 мая 2015 г.)*

# Результаты идентификации возмущений температуры

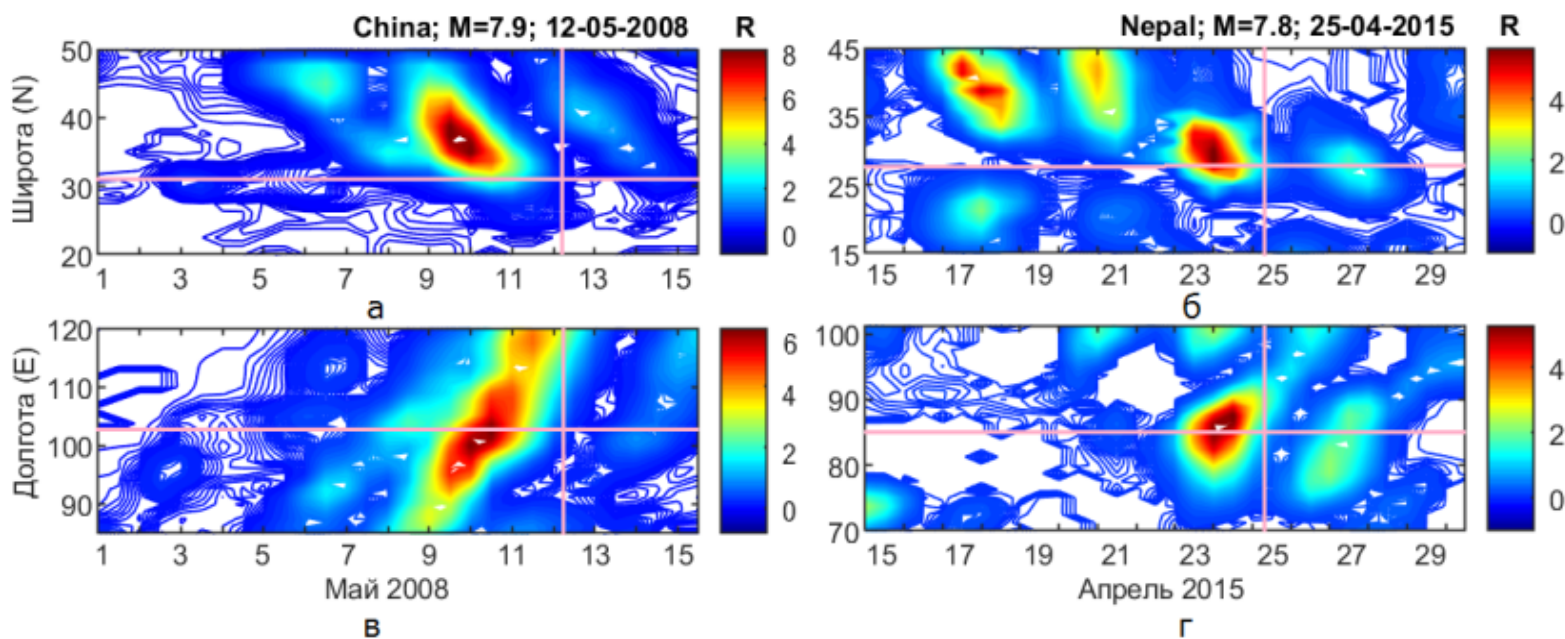
На *рисунке* показана пятимесячная динамика изменения параметров  $\delta T$  и  $\delta T_C$  и соответствующие последовательности магнитуд и числа землетрясений ( $N$ ) в каждые сутки. Всем четырем землетрясениям предшествовали сильные возмущения в UTLS, которые были идентифицированы по значительному увеличению  $\delta T_C$  вблизи их эпицентров. Подтверждением уникальности сейсмоатмосферных аномалий может являться отсутствие в рассматриваемые сейсмоактивные периоды "ложных" срабатываний алгоритма, превышающих пороговые уровни.



Динамика изменения параметров  $\delta T$  и  $\delta T_C$  (а, б, д, е) и последовательности магнитуд и числа землетрясений ( $N$ ) (в, г, ж, з) в сейсмоактивные периоды EQ1-EQ4

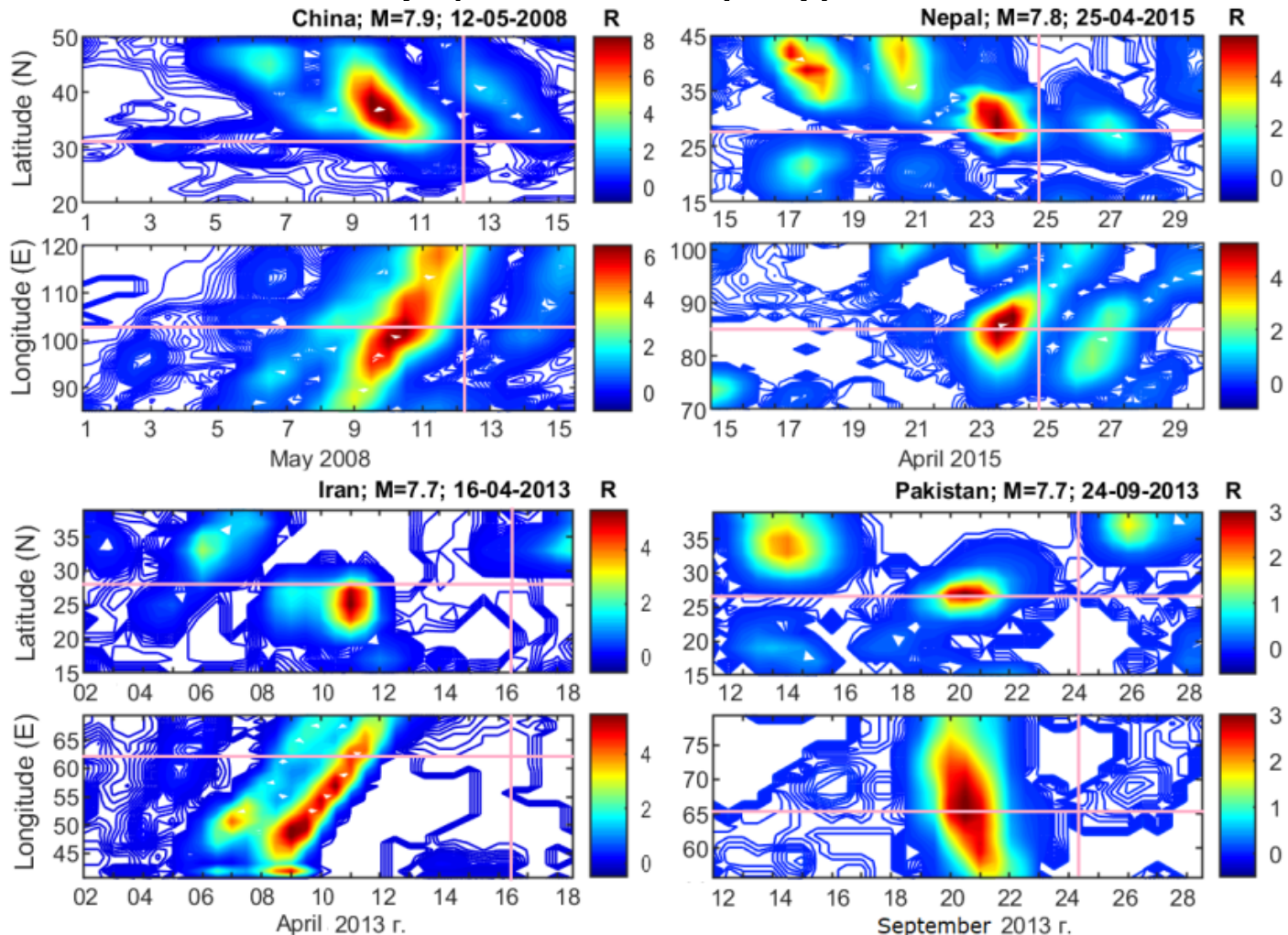
# Пространственно-временное распределение предсейсмических возмущений температуры в UTLS

На следующем этапе обработки спутниковых данных были построены карты пространственно-временного распределения аномальных изменений температуры. В качестве примера на рисунке показаны изменения во времени интегрального параметра  $\delta T_C$  по широте и долготе в периоды сейсмической активности в Китае (с 01 по 15 мая 2008 г.) и Непале (с 15 по 30 апреля 2015 г.). В обоих случаях предсейсмические возмущения температуры проявлялись в виде локализованных мезомасштабных областей повышенных значений параметра  $\delta T_C$ .



Распределения параметра  $\delta T_C$  по широте (а, б) и долготе (в, г) в Китае (с 01 по 15 мая 2008 г.) и Непале (с 15 по 30 апреля 2015 г.) Вертикальные и горизонтальные линии указывают моменты землетрясений и координаты их эпицентров, соответственно

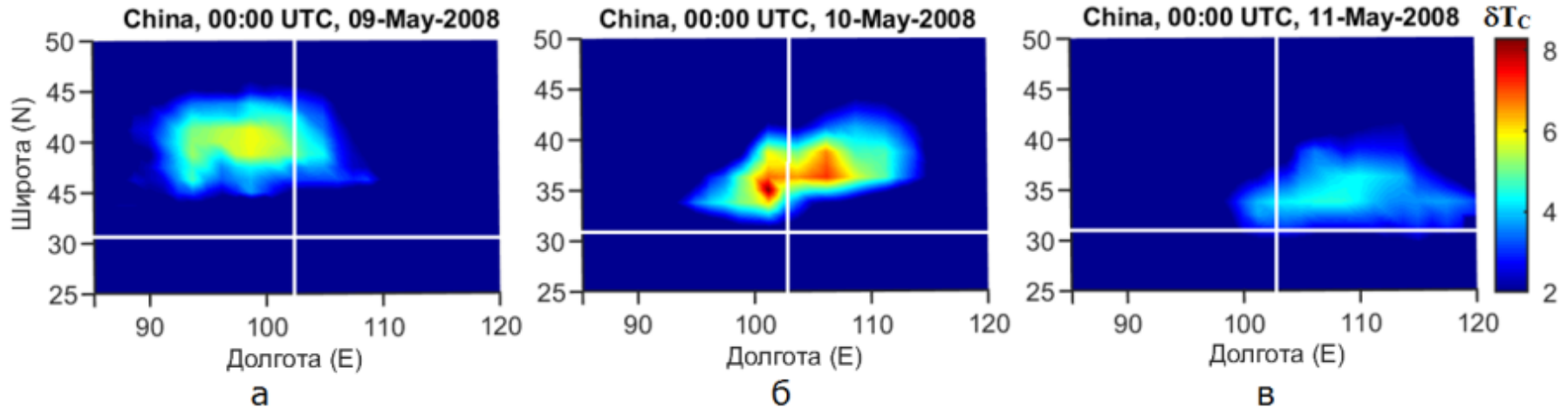
# Пространственно-временное распределение предсейсмических возмущений температуры в UTLs



Распределения параметра  $\delta T_c$  по широте (а, б) и долготе (в, г) в Китае (с 01 по 15 мая 2008 г.), Непале (с 15 по 30 апреля 2015 г.), Иране (со 02 по 18 апреля 2013 г.) и в Пакистане (с 12 по 28 сентября 2013 г.). Вертикальные и горизонтальные линии указывают моменты землетрясений и координаты их эпицентров, соответственно

# Пространственно-временное распределение возмущения температуры

Результаты расчета параметра  $\delta T_C$ , выполненные для каждого пиксела исследуемого региона в пределах координат 25–50°N и 80–120°E с 09 по 11 мая 2008 г., представлены на *рисунке*. Аномалия температуры начала развиваться 07–09 мая 2008 г. на северо-западе от эпицентра Сычуаньского землетрясения и постепенно перемещались в юго-восточном направлении. Максимум  $\delta T_C$  наблюдался в 00:00 UTC 10 мая 2008 г. и был смещен на ~3–4° к северу относительно эпицентра (*рисунки*). Возмущение температуры проявлялось в ограниченном пространственном объеме атмосферы с горизонтальным размером, составляющим ~800 км по долготе и около 500 км по широте. Это хорошо согласуется с результатами, полученными в период подготовки Нуринского землетрясения M=6.7 (05 октября 2008 г.).



*Пространственное распределение параметра  $\delta T_C \geq 2.0$  в 00:00 UTC: 09 мая 2008 г. (а); 10 мая 2008 г. (б) и 11 мая 2008 г. (в). Горизонтальные и вертикальные линии соответствуют координатам эпицентра землетрясения M=7,9 (31,00°N; 103,32°E)*

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, представленная обновленная версия алгоритма, основанного на использовании модифицированного критерия STA/LTA, обладает достаточно высокой эффективностью выделения предсейсмических возмущений температуры атмосферы. Обработка временных рядов температуры позволила выделить локальные мезомасштабные области аномальных изменений, синхронизированные как по времени, так и в пространстве с периодами подготовки крупнейших землетрясений  $M > 7.5$  Альпийско-Гималайского сейсмического пояса.

Аномалии сейсмогенного происхождения, характеризующиеся высокими значениями параметра  $\delta T_C$  ( $\geq 2.0$ ), проявлялись в виде хорошо выраженных мезомасштабных (300–800 км), относительно долгоживущих (от 18 до 36 часов) возмущенных областей, локализованных вблизи эпицентров. Максимумы  $\delta T_C$  наблюдались в пределах нескольких сотен километров от эпицентров и за 1–5 суток до этих землетрясений. Поскольку все события  $M > 7.5$  произошли на фоне спокойных геомагнитных условий, пространственные и временные распределения аномалий температуры дают основание предполагать вероятную связь с процессами подготовки сейсмических событий. Отмечается зависимость проявления аномалий температуры от глубины гипоцентра землетрясения, которая, вероятно, влияет на интенсивность динамического воздействия на атмосферу и играет важную роль в обнаружении сейсмоатмосферных эффектов.

## *Литература*

1. Свердлик Л.Г. Атмосферные эффекты крупнейших землетрясений Альпийско-Гималайского сейсмического пояса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 81–90.
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. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 783–793.
4. 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.
5. 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!  
Thank you for  
attention!**