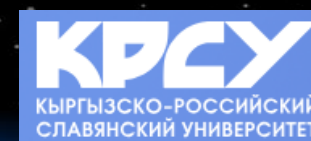


РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА АТМОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ПЕРИОДЫ ПОДГОТОВКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ПЕРУ-ЧИЛИЙСКОЙ ЗОНЕ СУБДУКЦИИ



Свердлик Л.Г. (l.sverdlik@mail.ru)

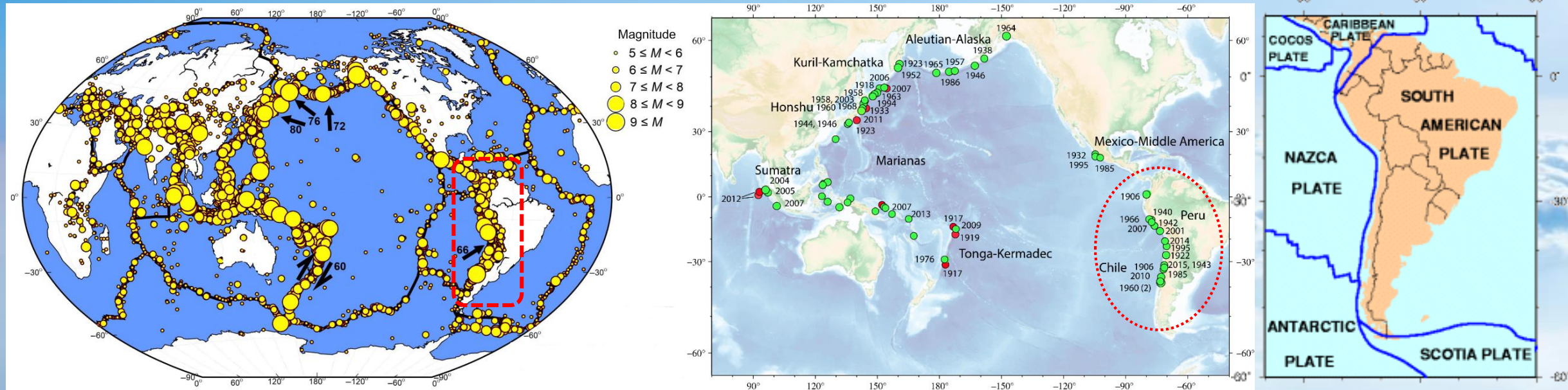
Научная Станция Российской Академии Наук в г. Бишкеке (НС РАН)
Кыргызско-Российский Славянский Университет (КРСУ),
Высокогорная Обсерватория Физики Атмосферных Процессов
КРСУ и НС РАН



24 Международная Конференция «Современные проблемы дистанционного
зондирования Земли из космоса»
Институт Космических Исследований РАН, Москва,
09-12 ноября, 2026

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.



Землетрясения Земли с магнитудами $M \geq 5$, произошедшие в период 1976–2020 годов. Все крупные землетрясения $M > 8$ локализованы в зонах субдукции литосферных плит. Зоны расхождения тектонических плит отмечены событиями с магнитудами в диапазоне $5 < M < 7$ (Lobkovsky et al., 2023). Одним из самых высоких показателей высвобождения сейсмической энергии в мире характеризуется западное побережье Южной Америки, где океаническая плита Наска погружается под континентальную Южно-Американскую плиту

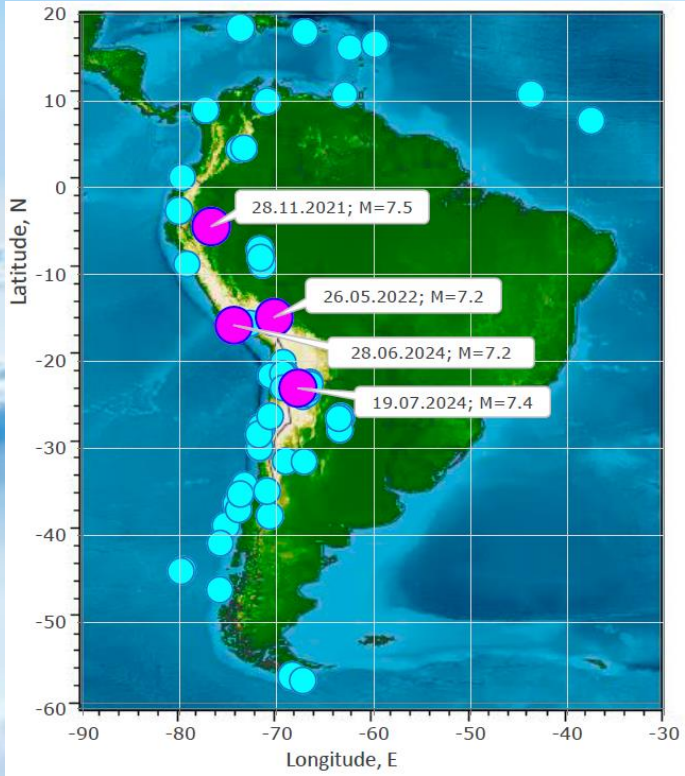
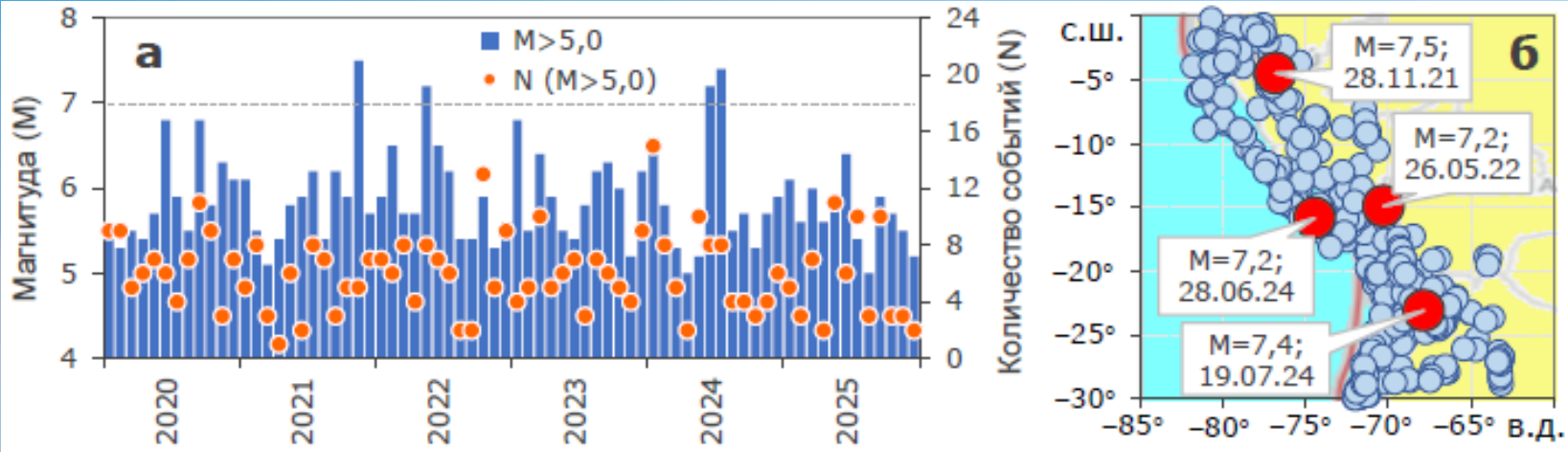
Исследование предсейсмических возмущений основано на использовании данных спутниковых наблюдений за эволюцией вертикальной структуры температуры верхней тропосферы и нижней стратосферы (UTLS) с учетом взаимосвязи между вариациями температуры на разных изобарических уровнях.

Цель исследования пространственно-временной изменчивости термических и динамических параметров нижней атмосферы:

1. дополнить результаты диагностирования возмущений, полученные ранее в сейсмически опасных регионах Европы и Азии;
2. выявить региональные особенности предсейсмических возмущений температуры в UTLS в Перу-Чилийской зоне субдукции.

Сейсмическая активность исследуемого региона

В данном исследовании впервые проанализированы атмосферные эффекты, предшествующие сильным сейсмическим событиям с магнитудами $M > 7,0$, зарегистрированным в 2020–2025 гг. на территории Перу и Чили ($0\text{--}30^\circ$ ю.ш. и $60\text{--}85^\circ$ з.д.).



Последовательность магнитуд и числа землетрясений $M \geq 5,0$ (N) в 2020–2025 гг. (а).

Пространственное распределение эпицентров событий $M > 5,0$ и $M > 7,0$ (б)

Таблица. Характеристики землетрясений (EQ) $M > 7,0$ (<https://earthquake.usgs.gov>)

№	Дата	Время, UTC	Широта, град. с.ш.	Долгота, град. в.д.	D, км	M	Расположение эпицентров
EQ1	2021-11-28	10:52:14	−4,47	−76,81	126,0	7,5	43 км от г. Барранка (Barranca), Перу
EQ2	2022-05-26	12:02:21	−14,91	−70,29	236,0	7,2	10 км от г. Асангаро (Azngaro) Перу
EQ3	2024-06-28	05:36:37	−15,83	−74,45	24,0	7,2	Район Атикипа (Atiquipa), Перу
EQ4	2024-07-19	01:50:49	−23,08	−67,84	127,3	7,4	Сан-Педро-де-Атакама, Чили

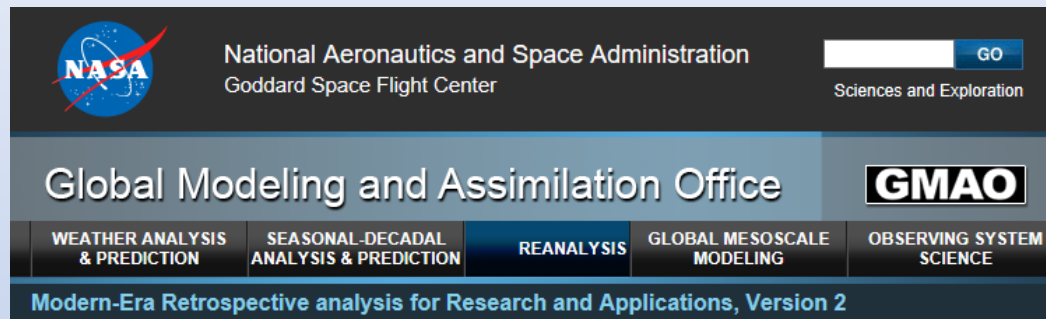
Согласно данным каталога USGS в этой области произошло 433 землетрясения $M \geq 5,0$, четыре из которых имели магнитуду $M > 7,0$. Характеристики этих сейсмических событий приведены в *Таблице*.

Данные спутниковых измерений температуры (глобальный реанализ MERRA-2)

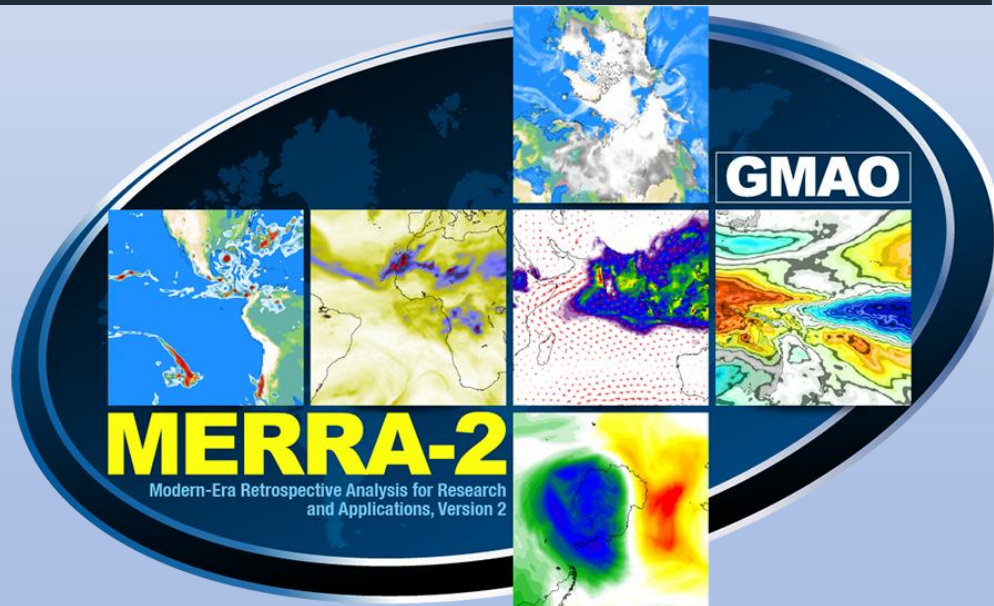
MERRA-2 (The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications)

[\(https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/\)](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 и пространственным разрешением $0.5^\circ \times 0.625^\circ$.



MERRA-2 отражает последние достижения в области атмосферного моделирования и ассимиляции данных. Современные наблюдения гиперспектрального и микроволнового излучения, а также данные GPS-радиозондирования и данные НАСА об озоне интегрированы в MERRA-2

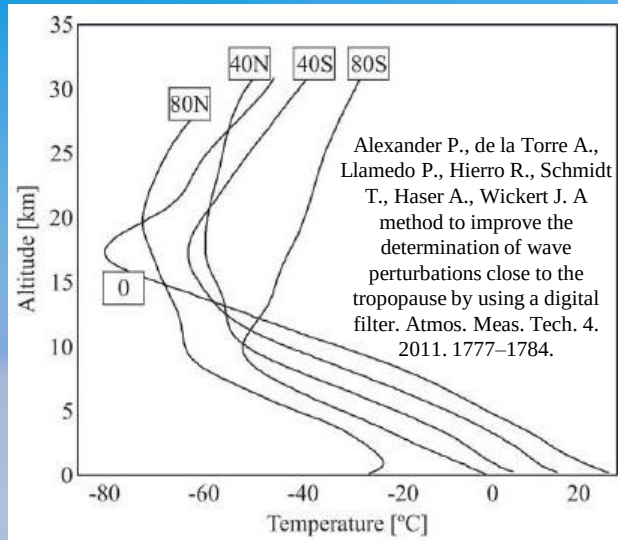


Анализируемые данные температуры $T(t)$:

- 12 уровней давления;
- от 500 до 40 гПа;
- диапазон высот ~ 5.0 – 24.0 км;
- разрешение $0.5^\circ \times 0.625^\circ$;
- $\Delta t = 3$ ч.

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

Особенности вертикальной структуры верхней тропосферы и нижней стратосферы (UTLS)

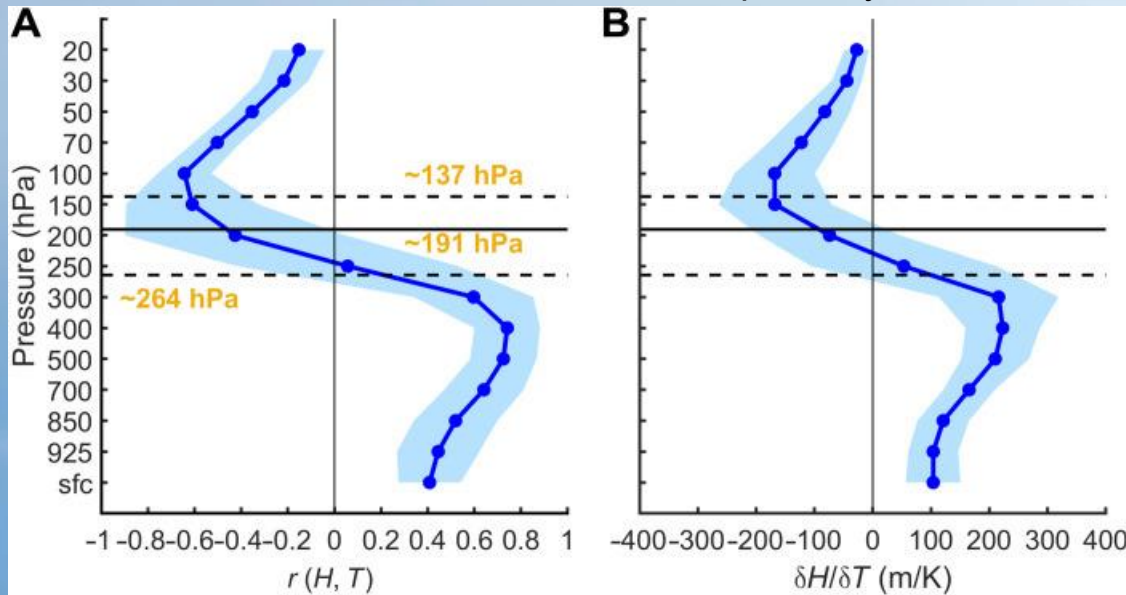


Вертикальная структура верхней тропосферы и нижней стратосферы (UTLS) существенно зависит от широты, проявляясь в изменении высоты тропопаузы от ~16–18 км на экваторе до ~8–10 км у полюсов.

← Профили средней температуры в низких, средних и высоких широтах, усредненные по зонам от 80° с. ш. до 80° ю. ш. (январь 2007 г.)

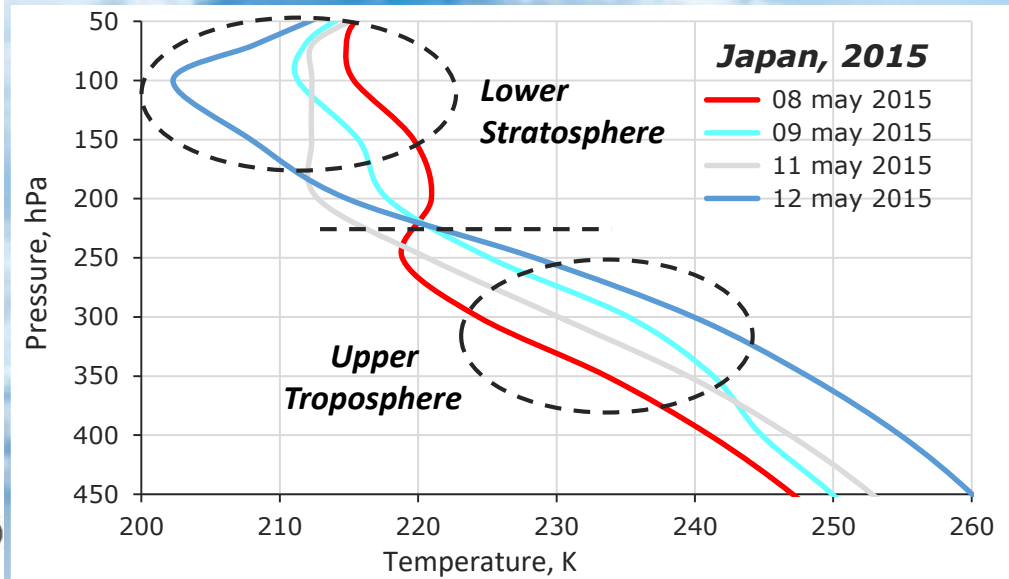
Наиболее информативные уровни в UTLS определялись для каждого конкретного расположения эпицентра землетрясения с учетом особенностей динамики нижней атмосферы.

В качестве главных признаков, характеризующих поведение температуры атмосферы перед сильными землетрясениями, рассматривались аномальные изменения амплитуды, частоты и фазы вариаций температуры в разделенных тропопаузой слоях UTLS.



(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)



Трансформация вертикальных профилей температуры. Устойчивые противофазные колебания температуры наблюдались в верхней тропосфере (UT) и над тропопаузой (LS)

Алгоритм выделения и идентификации предсейсмических возмущений IPPLA

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>):

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

где: t_i - время текущей выборки временного ряда T 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 .

Межсуточная изменчивость температуры 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 по времени.

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

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

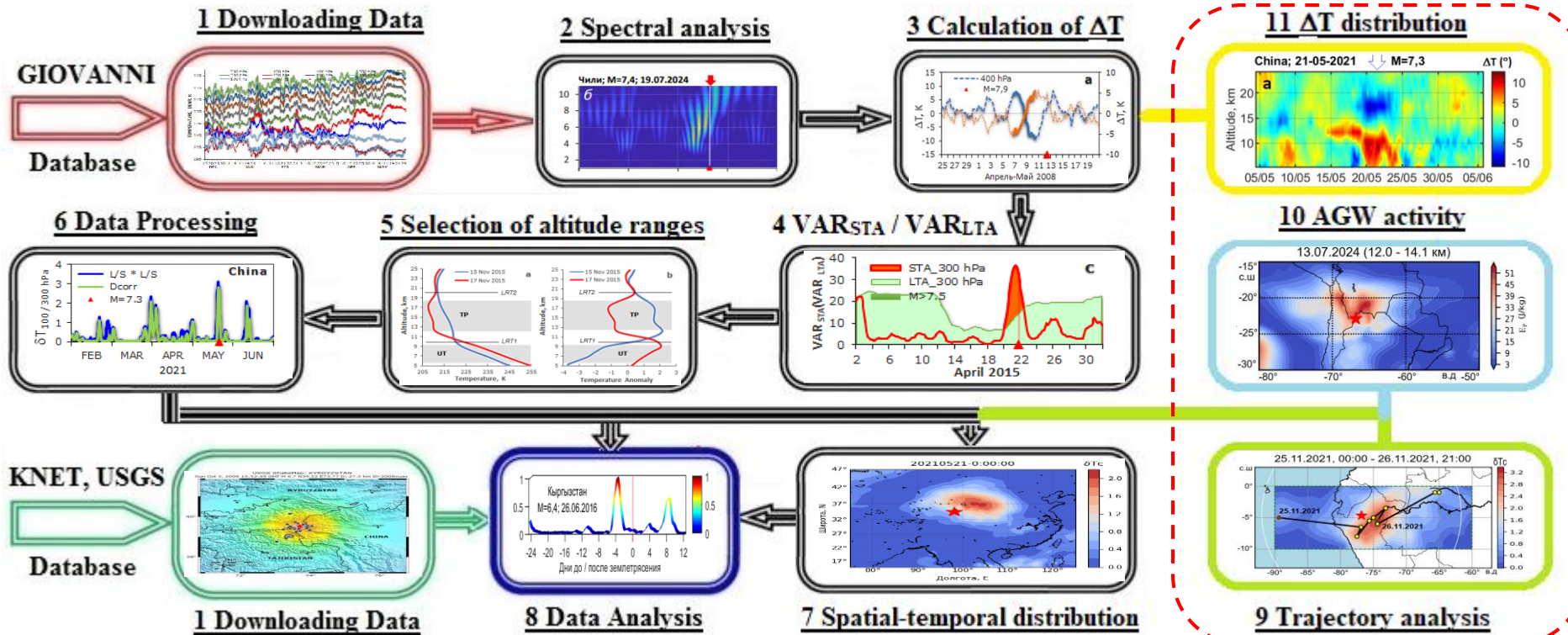
Идентификация предсейсмических аномалий температуры основывалась на трех известных положениях критерия **DTS–T** (Deviation-Time-Space-Thermal) (Qin et al., 2013; Rasheed et al., 2024):

- 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**.



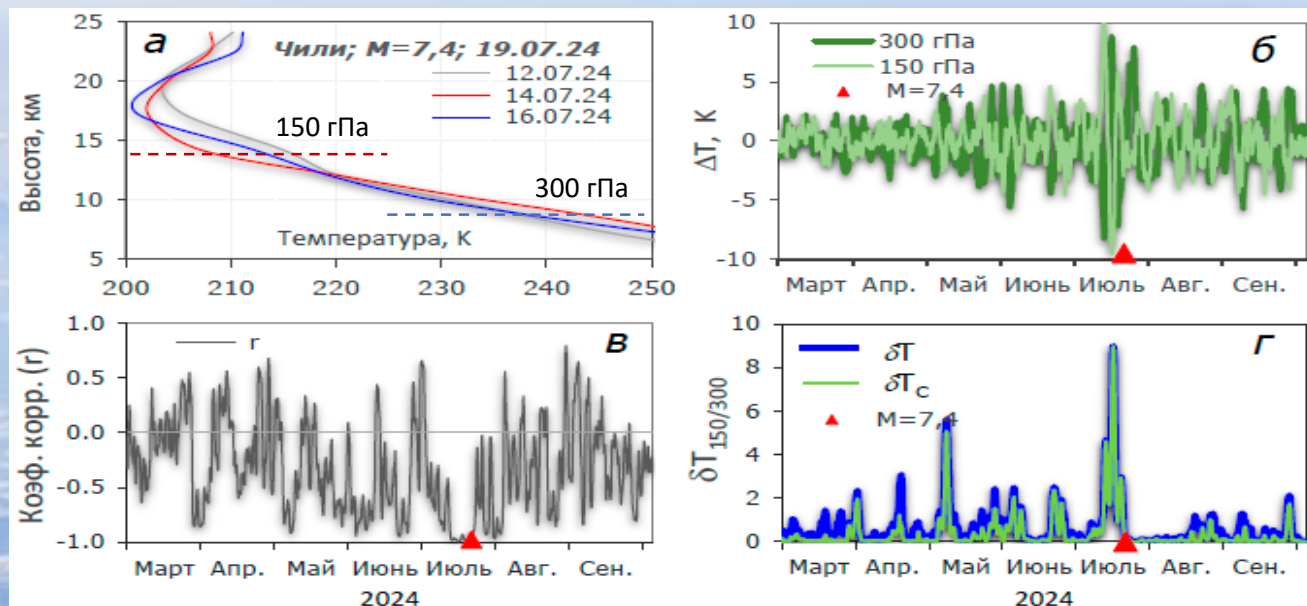
Блок-схема алгоритма вычисления показателей аномальных вариаций температуры



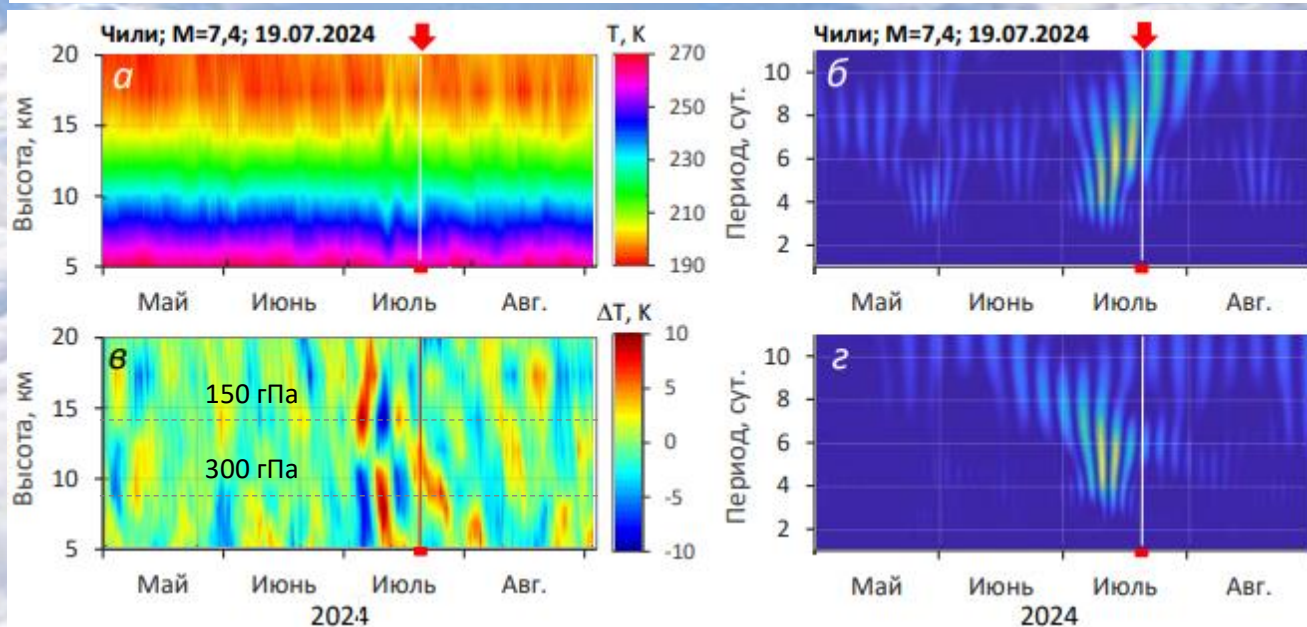
Обработка данных спутниковых измерений температуры включает следующие этапы:

1. Загрузка исходных сейсмических (M , x , y , D , t) и температурных данных ($T(x, y, n, t, p_k)$).
2. Спектральный анализ (CWT).
3. Вычисление межсуточных вариаций температуры $\Delta T(t, \delta) = T(t_i) - T(t_{i-\delta})$
4. Сравнение скользящих дисперсий (VAR) в коротком (STA) и длинном (LTA) временных окнах: $R = VAR_{STA} / VAR_{LTA}$
5. Выбор наиболее информативных высотных диапазонов на основе корреляционного анализа.
6. Динамика изменения интегральных показателей аномальных вариаций δT_c (δT).
7. **Определение пространственно-временного распределения параметра $\delta T_c(x, y, t)$.**
8. Анализ температурных и сейсмических данных.
9. Траекторный анализ расположения максимумов параметра δT_c в пределах зоны подготовки землетрясений.
10. Вычисление плотности потенциальной энергии (E_p), связанной с атмосферными гравитационными волнами.
11. Пространственно-временное распределение межсуточных вариаций температуры ΔT .

Временная эволюция температуры в верхней тропосфере и области тропопаузы



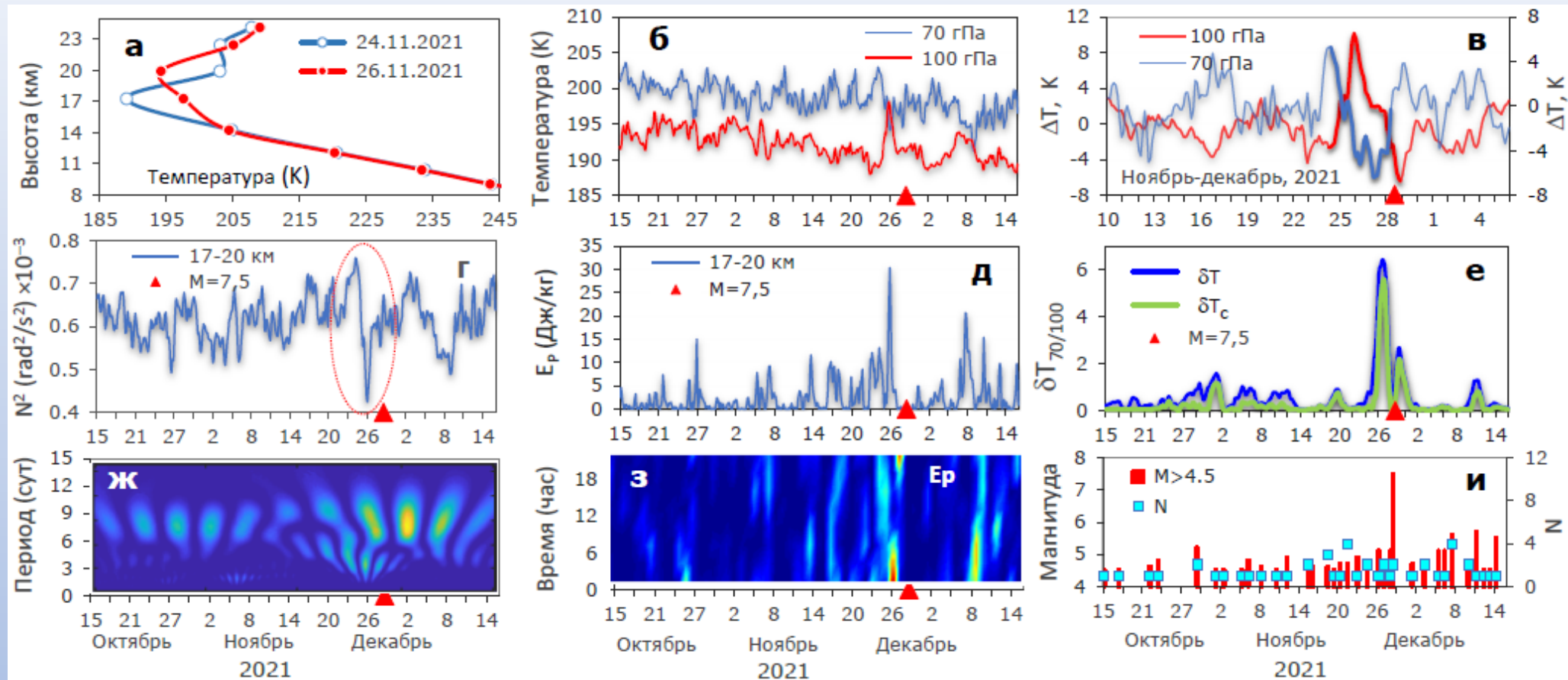
Трансформация вертикальных профилей температуры (а), межсуточные вариации температуры (ΔT) на уровнях 300 и 150 гПа (~9.0 и 14.0 км) (б), коэффициент корреляции между ними (в) и соответствующие изменения интегральных параметров δT и δT_c (г) с марта по сентябрь 2024 г. Красный маркер соответствует моменту землетрясения $M=7,4$ в Чили (19.07.2024)



Высотно-временные распределения температуры (T) (а), межсуточных вариаций температуры (ΔT) (б) и вейвлет-спектрограммы временных рядов температуры на уровнях 300 гПа (б) и 150 гПа (г) в период с 01 мая по 31 августа 2024 г. Вертикальные белые линии – момент землетрясения $M=7,4$ (19.07.2024)

Результаты диагностирования предсейсмических возмущений температуры

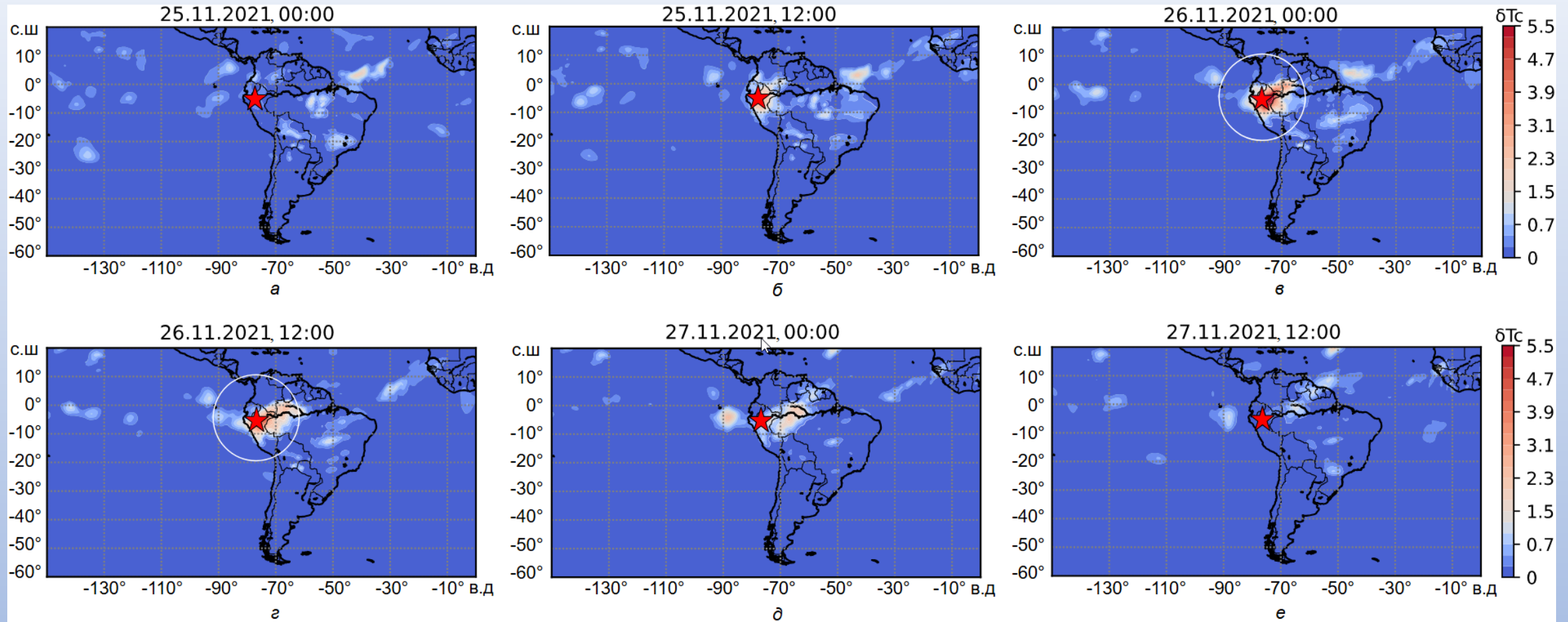
Задача выделения предсейсмических возмущений в UTLS решалась с использованием специально разработанного алгоритма «IPPLA», который ранее уже применялся к событиям в нескольких сейсмически опасных регионах Евразии.



Вертикальные профили температуры над эпицентром землетрясения за 2 и 4 дня до события (а), временные ряды температуры T (б) и приращений температуры ΔT (в) на уровнях 100 и 70 гПа (~ 17.3 и 19.9 км), квадрата частоты Брента-Вяйсяля N^2 (г) и плотности потенциальной энергии E_p на высоте 17–20 км (д), интегральных параметров δT и δT_c (е), вейвлет-спектрограмма временного ряда температуры на уровне 100 гПа (ж), вариации E_p (з), магнитуды M и количество землетрясений за сутки N (и) с 15 октября по 15 декабря 2021 г.

Предсейсмические возмущения температуры

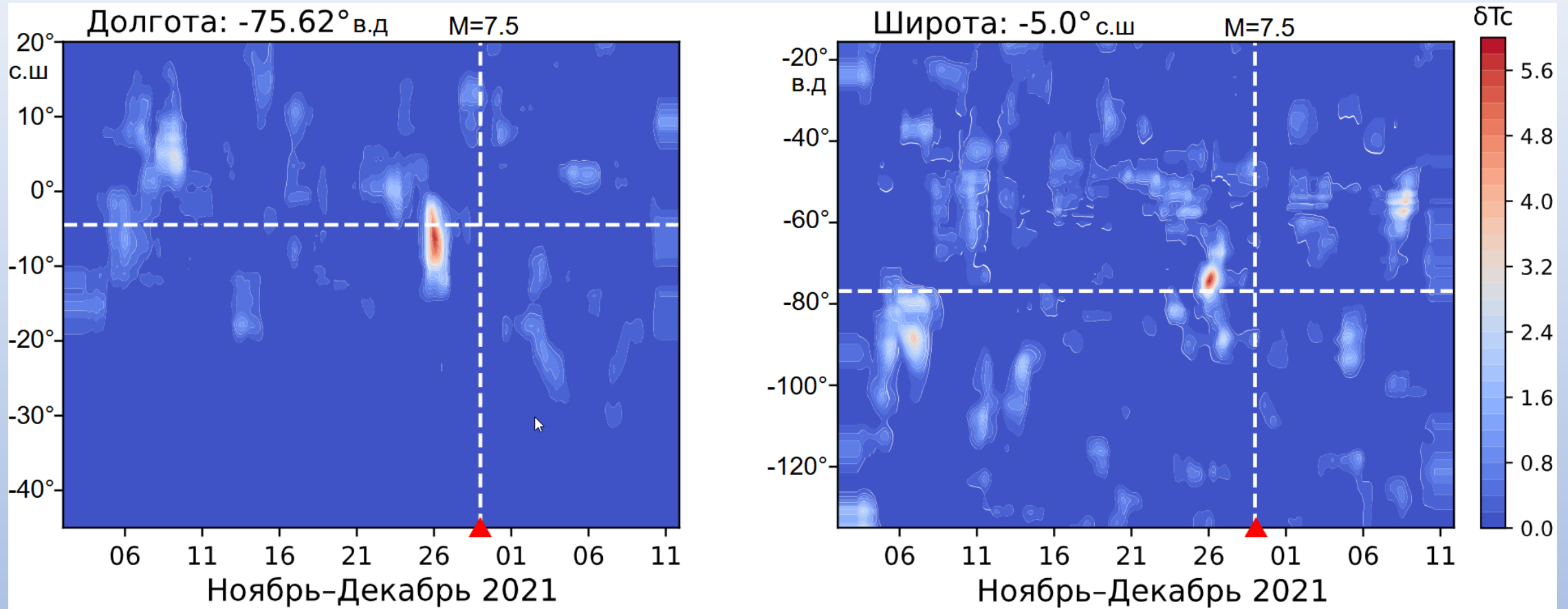
Предсейсмическая аномалия наблюдалась в виде устойчивого в пространстве и времени мезомасштабного возмущения температуры, которое располагалось непосредственно над его эпицентральной областью и сохраняло свое положение на протяжении 24 часов.



Эволюция пространственного распределения параметра δT_c в период с 25 по 27 ноября 2021 г. (а–е).
Маркером показан эпицентр землетрясения $M=7,5$ (28.11.2021; 10:52:14 UTC; $-4,47^\circ$ с. ш.; $-76,81^\circ$ в. д.) в Перу.
Белым кругом обозначена область подготовки землетрясения (Dobrovolsky et al., 1979)

Предсейсмические возмущения температуры

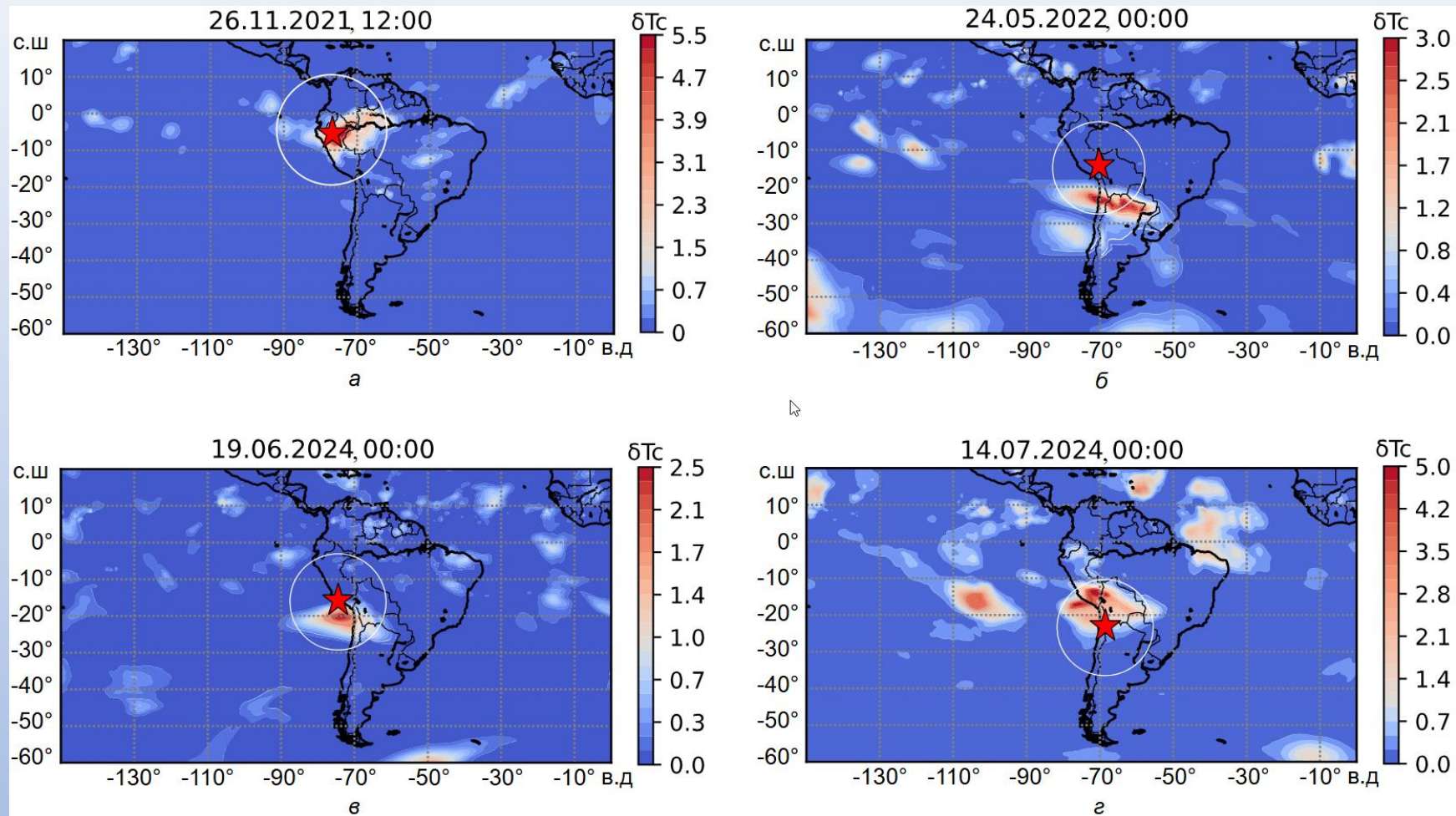
В течение всего ноября 2021 года на временных распределениях параметра δT_C по широте и долготе кроме выделенной предсейсмической тепловой аномалии никаких других заметных, а тем более сопоставимых по интенсивности возмущений во всей обширной исследуемой области не наблюдалось.



Временные распределения параметра δT_C по широте (а) и долготе (б) в период с 01 ноября по 10 декабря 2021 г. Горизонтальные линии соответствуют координатам эпицентра, а вертикальные - времени землетрясения $M=7,5$ (28.11.2021)

Предсейсмические возмущения температуры

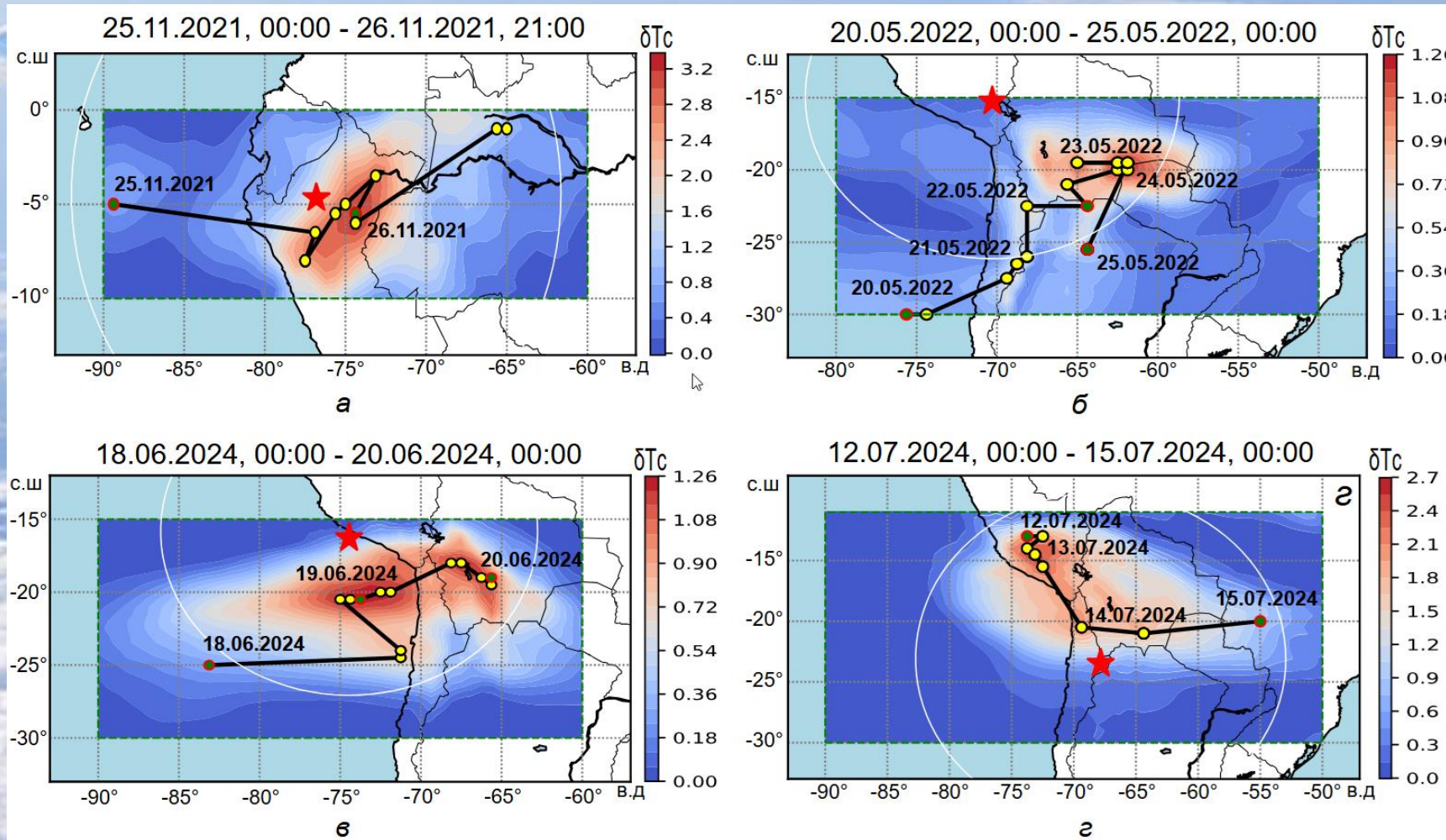
Предсейсмические возмущения температуры для всех четырех землетрясений были сопоставимы по продолжительности (1–2 суток) и интенсивности ($\delta T_c = 1,6–2,0$), коррелировали со временем событий и концентрировались в пределах области с радиусом Добровольского.



Предсейсмические возмущения температуры. Маркерами показаны эпицентры соответствующих землетрясений (EQ1–EQ4): $M=7,5$ (28.11.2021) (а); $M=7,2$ (26.05.2022) (б); $M=7,2$ (28.06.2024) в Перу (в); $M=7,4$ (19.07.2024) в Чили (г)

Пространственно-временная эволюция температуры в UTLS

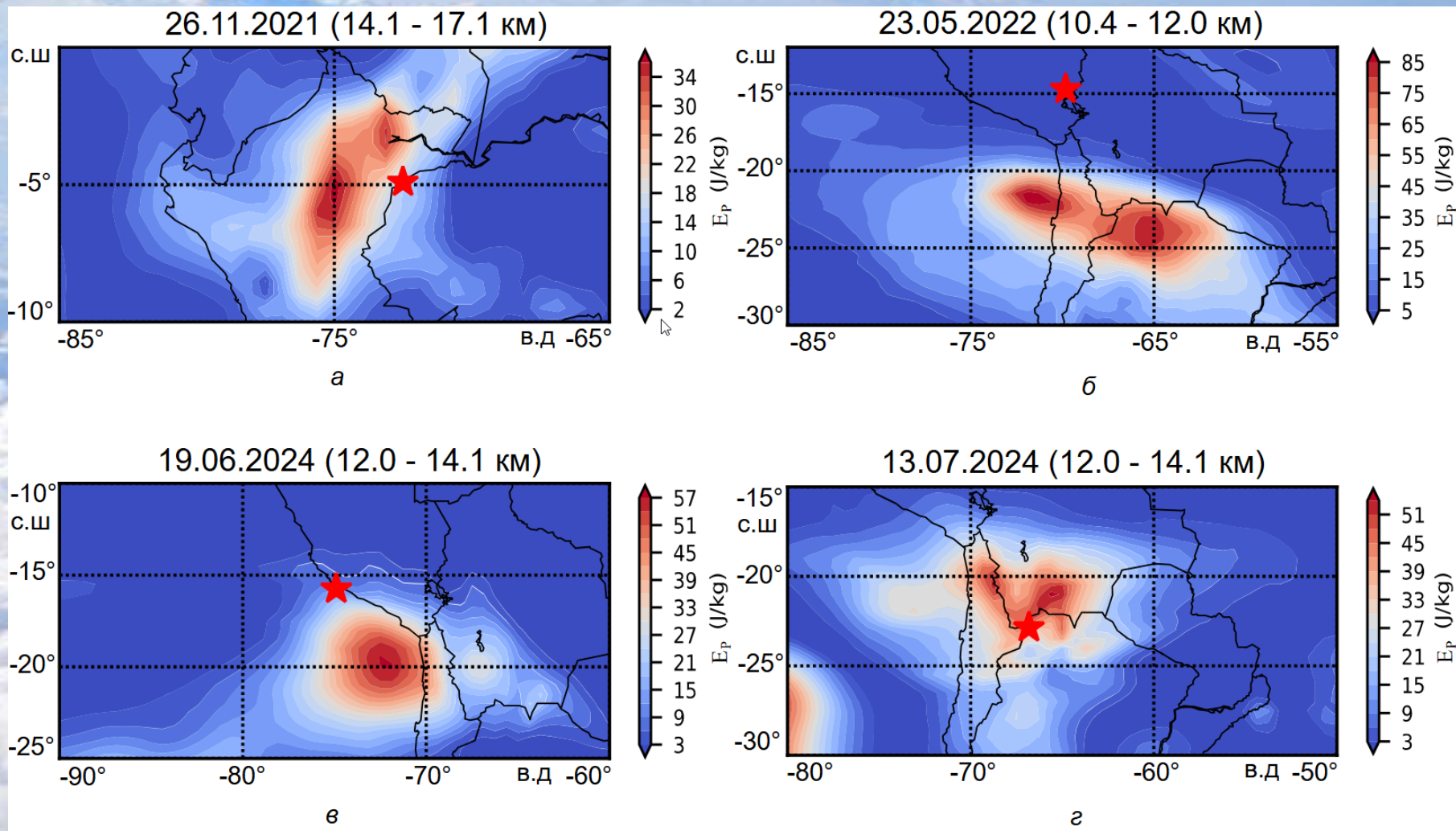
Карты распределения параметра δT_C , усредненные за определенные временные интервалы (от 2 до 5 суток) и совмещенные с траекториями максимумов δT_C , были рассчитаны для каждого момента времени в пределах области подготовки землетрясений.



Карты пространственного распределения параметра δT_C , усредненные за периоды 25–26 ноября 2021 г. (а); с 20 по 25 мая 2022 г. (б), с 18 по 20 июня 2024 г. (в), 12–15 июля 2024 г. (г). Черными линиями показаны траектории максимумов δT_C в указанные моменты времени (даты). Белыми кругами обозначены области подготовки землетрясений EQ1–EQ4

Плотность потенциальной энергии (E_p) гравитационных волн

На основе использования особенностей изменчивости температурных профилей в UTLS были рассчитаны пространственные распределения плотности потенциальной энергии (E_p), связанной с гравитационными волнами, и определены диапазоны высот, на которых наблюдались наиболее заметные предсейсмические возмущения.



Пространственные распределения E_p (Дж/кг) перед землетрясениями EQ1–EQ4

Высотные распределения плотности потенциальной энергии гравитационных волн на единицу массы воздуха рассчитывались в соответствии со следующими формулами:

$$E_p = \frac{g^2}{2N^2} (\overline{T' / T})^2$$

где: $|T'| / \overline{T}$ – амплитуды нормированных возмущений температуры, g – ускорение свободного падения. Частота Брента-Вяйсяля (N) определялась, как:

$$N^2 = \frac{g}{T} \left(\frac{\partial T}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right)$$

где: c_p – удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении, $g/c_p = 9.8 \times 10^{-3}$ К/м – адиабатический градиент температуры, z – вертикальная координата.

Выводы

Таким образом, исследования возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере, которые были впервые проведены в сейсмически опасном регионе Южной Америки, **подтвердили** практически все выявленные ранее признаки и особенности предсейсмических тепловых аномалий в UTLS. Было установлено, что пространственно-временная эволюция мезомасштабных возмущений температуры достаточно хорошо согласуется с динамикой сейсмической активности. Устойчивые в пространстве и времени мезомасштабные возмущения температуры наблюдались за 1–9 суток до событий.

Очевидно, что геологическая структура прилегающей к океану территории Чили и Перу гораздо более специфична, чем во внутренних материковых районах Азии, поэтому можно было ожидать, что это будет сказываться на процессах формирования предсейсмических аномалий и осложнять их обнаружение. Однако результаты анализа спутниковых данных во всех исследуемых случаях, также, как и во внутриконтинентальных регионах были в значительной степени подобны и указывали на существенные изменения температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере в периоды сейсмической активности, как это демонстрируют приведенные выше примеры.

Пространственные и временные характеристики тепловых аномалий во время рассматриваемых землетрясений (по горизонтальным размерам, интенсивности и продолжительности) согласуются с результатами, связанными с событиями аналогичной магнитуды в сейсмически активных регионах Евразии.

Из проведенного исследования следует, что в периоды подготовки сейсмических событий в изменениях температуры наблюдались четко выраженные 4–6 суточные периодичности. Поскольку вероятность обнаружения возмущений температуры зависит от магнитуды землетрясений, для событий с магнитудами $M \geq 7,0$ возмущения выделялись достаточно уверенно. В качестве предполагаемого механизма рассматривались атмосферные гравитационные волны. Установлено, что перед землетрясениями усиление потенциальной энергии гравитационных волн E_p происходило в диапазоне высот 10–17 км.

Полученные результаты можно рассматривать в качестве предварительных. Тем не менее положительные результаты исследования служат подтверждением того, что используемый алгоритм разработан не под конкретные условия мониторинга, а может быть применен глобально, как при анализе вариаций температуры в сейсмоактивных регионах Евразии, так и в зоне субдукции в Южной Америке.

Литература

1. *Свердлик Л.Г.* Динамика возмущений в нижней атмосфере в сейсмически активных регионах Азии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 144–152. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-144-152.
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.

Спасибо за внимание!