

АНОМАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ МЕТЕОПАРАМЕТРОВ В НИЖНЕЙ АТМОСФЕРЕ ПЕРЕД ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ С МАГНИТУДАМИ $M > 7.0$ В КИТАЕ



Свердлик Л.Г. (l.sverdlik@mail.ru)

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

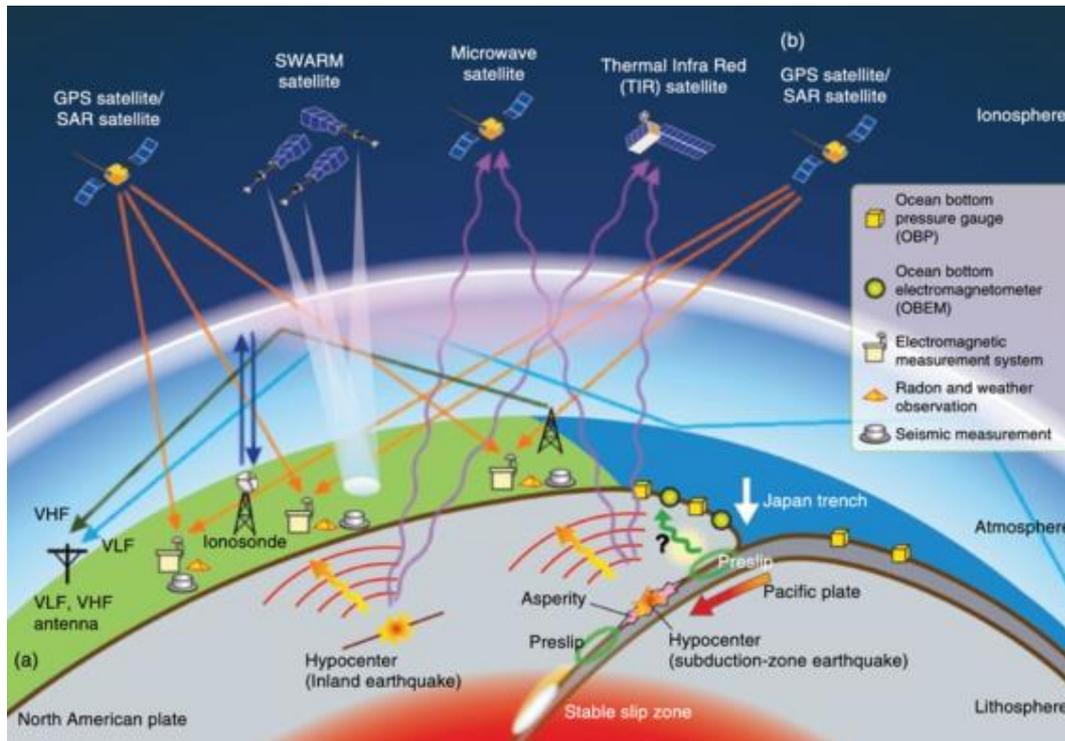


22 Конференция «Современные проблемы дистанционного
зондирования Земли из космоса»
Институт Космических Исследований РАН, Москва,
11-15 ноября, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Исследования воздействия сильных землетрясений на атмосферу с целью выявления закономерностей в изменении различных ее параметров особенно активно проводятся в последние десятилетия, что связано со значительным прогрессом в развитии и совершенствовании спутниковых технологий, многообразием информации, а также доступностью большого количества специализированных сервисов.

Одним из проявлений сейсмоатмосферных возмущений являются тепловые аномалии, наблюдаемые на различных уровнях атмосферы, что подтверждается экспериментами в разных регионах. Область верхней тропосферы – нижней стратосферы является наименее изученной с точки зрения установления взаимосвязи между динамикой изменчивости различных ее параметров и сейсмичностью.



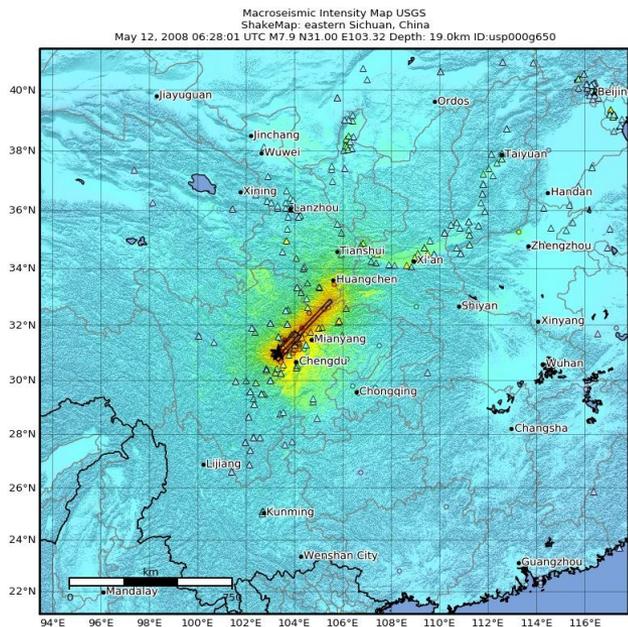
В рамках данного исследования был проведен анализ термической и ветровой структуры верхней тропосферы и нижней стратосферы, выделены аномальные вариации метеорологических параметров, которые сопоставлены с динамикой сейсмической активности в исследуемых регионах с целью обнаружения взаимосвязи между процессами в литосфере и атмосфере.

Данные сейсмических измерений

Два разрушительных землетрясения с магнитудами $M=7,9$ и $M=7,3$ произошли в Китае 12 мая 2008 г. и 21 мая 2021 г., соответственно. На примере этих событий были проанализированы пространственно-временные распределения предсейсмических возмущений, основанные на данных спутникового дистанционного зондирования

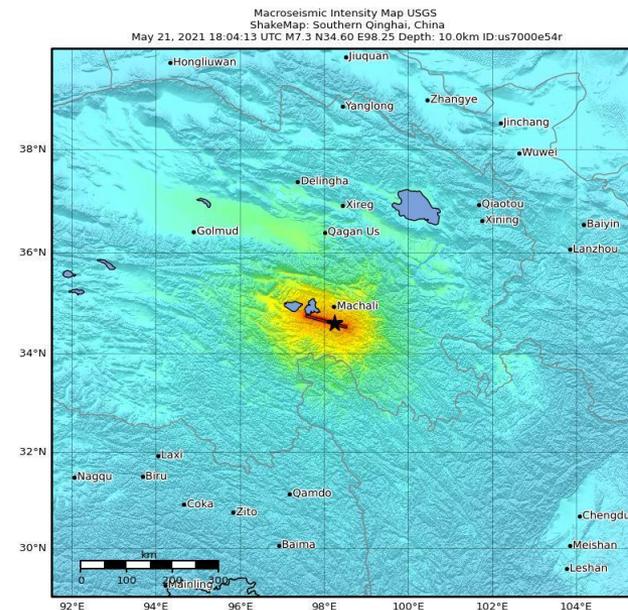
Таблица 1. Характеристики землетрясений $M>7,0$

№	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	21.05.2021	18:04:13	34,60	98,25	10,0	7,3	S. Qinghai, China



SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy
PGA(%g)	<0.0464	0.297	2.76	6.2	11.5	21.5	40.1	74.7	>139
PGV(cm/s)	<0.0215	0.135	1.41	4.65	9.64	20	41.4	85.8	>178
INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI

Scale based on Worden et al. (2012) Version 1: Processed 2020-06-04T05:22:56Z
 Δ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter □ Rupture



SHAKING	Not felt	Weak	Light	Moderate	Strong	Very strong	Severe	Violent	Extreme
DAMAGE	None	None	None	Very light	Light	Moderate	Moderate/heavy	Heavy	Very heavy
PGA(%g)	<0.0464	0.297	2.76	6.2	11.5	21.5	40.1	74.7	>139
PGV(cm/s)	<0.0215	0.135	1.41	4.65	9.64	20	41.4	85.8	>178
INTENSITY	I	II-III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X-XI

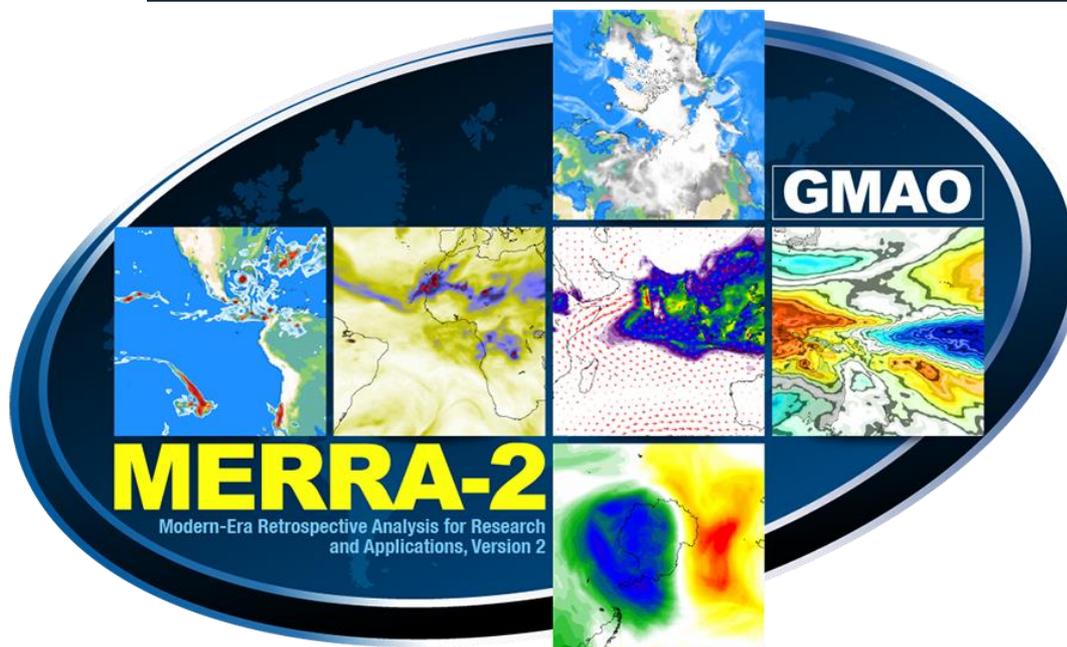
Scale based on Worden et al. (2012) Version 9: Processed 2024-05-21T20:41:01Z
 Δ Seismic Instrument ○ Reported Intensity ★ Epicenter □ Rupture

Расположение эпицентров анализируемых землетрясений $M>7.0$ (<https://earthquake.usgs.gov>)

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/)



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 $50-110^\circ$ в.д.;
- $\Delta t = 3$ ч.;

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

Алгоритм выделения и идентификации предсейсмических возмущений

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 температуры (Т) на изобарическом уровне p_k ; N_S - длина короткого (STA) временного окна; N_L - размер длинного (LTA) окна; $CF(t_i)$ - значение характеристической функции в момент времени t_i и порог обнаружения THR.

Критерий STA/LTA

(Short-Time-Average / Long-Time-Average)

Межсуточные приращения ΔT , вычисленные как разность между значениями Т для одного и того же момента времени, отстоящими 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 UT и LS:

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

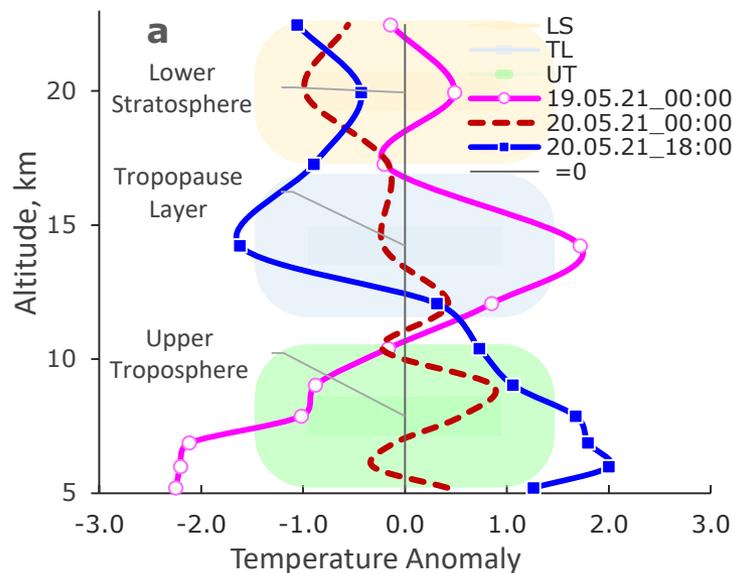
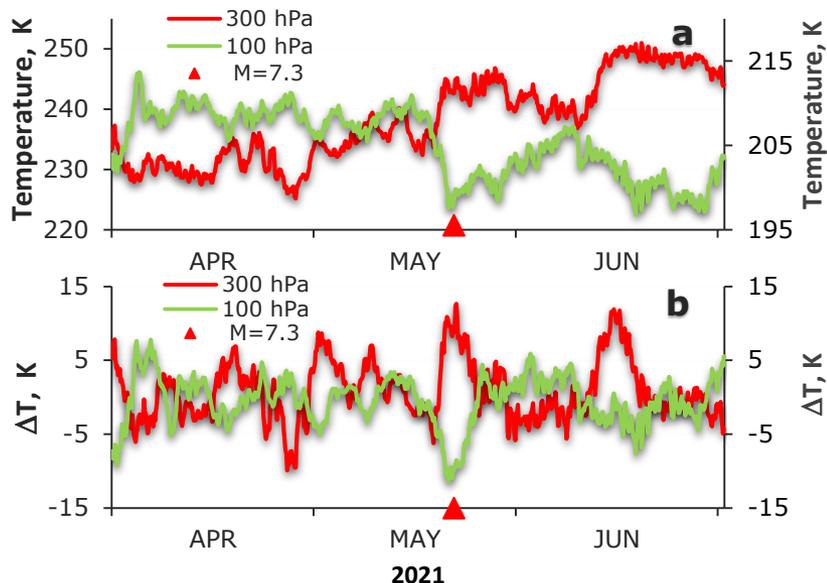
Интегральные параметры аномальных вариаций δT_C (δT):

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

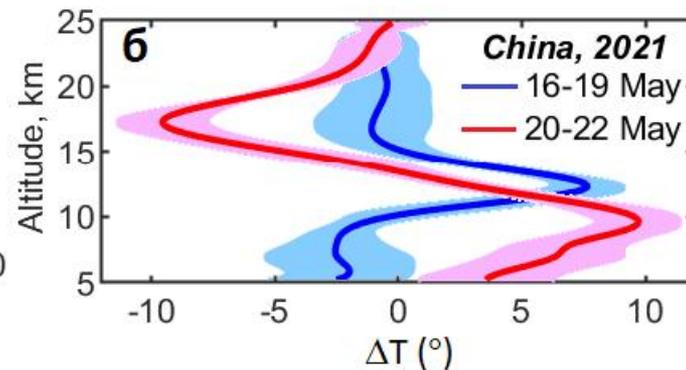
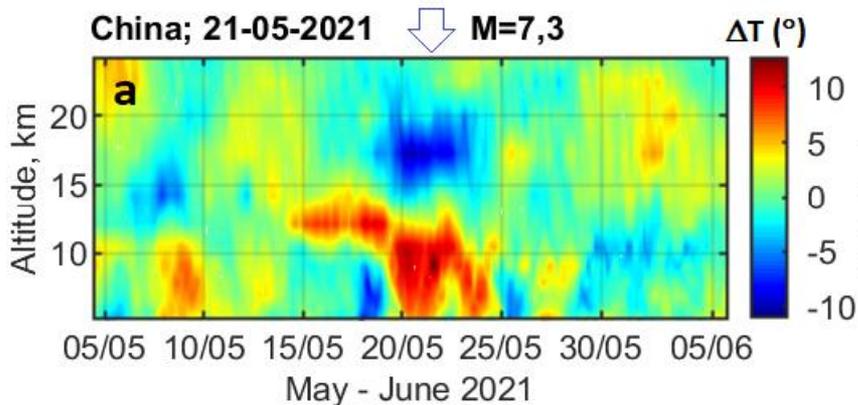
$$\delta T_C(t_i) = \begin{cases} 0,00 - \text{если } -r(t_i)_{STA} \geq 0 \\ \delta T(t_i) \times |r(t_i)_{STA}| - \text{если } -r(t_i)_{STA} < 0 \end{cases}$$



Пред- и постсейсмические возмущения температуры (Китай, 2021 г.)



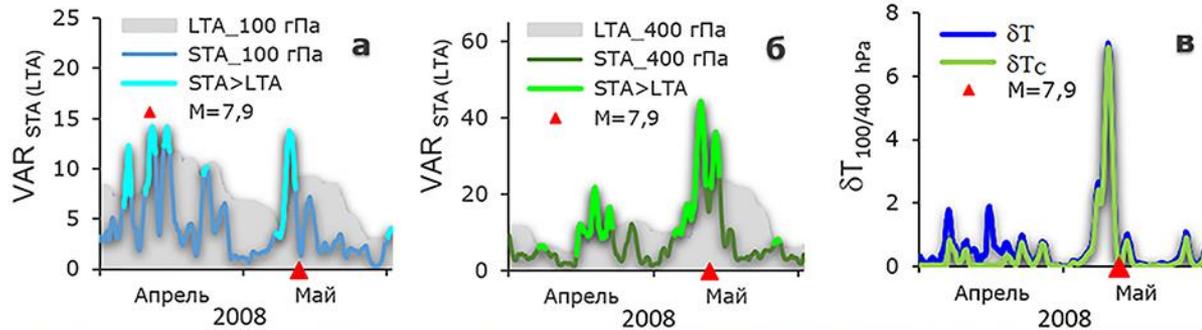
Исходные временные ряды температуры (a) и межсуточных изменений температуры (b) на уровнях 300 и 100 hPa в апреле – июне 2021 г. Вертикальные профили аномалий температуры



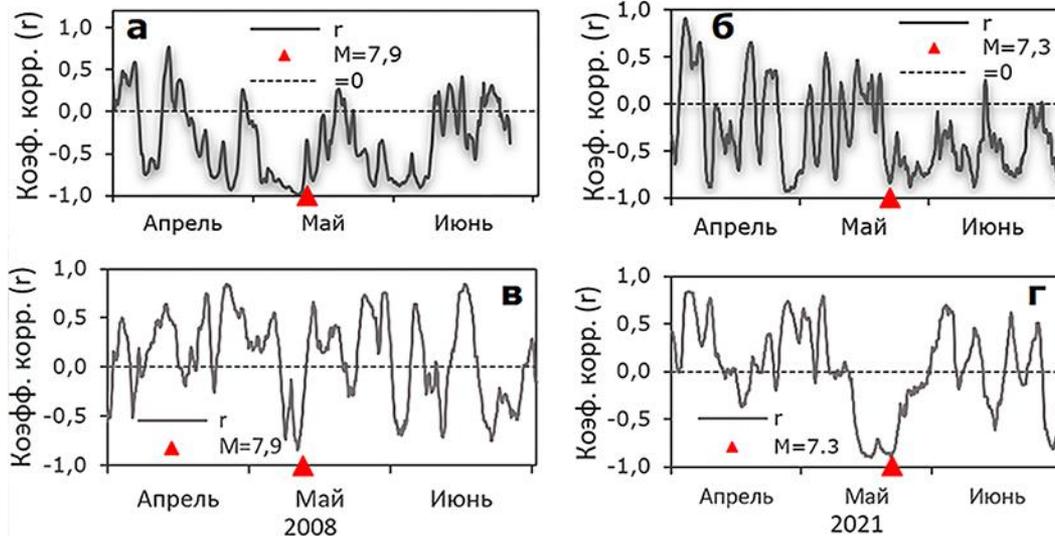
Высотно-временные распределения ΔT (a) с 05 мая по 05 июня 2021 г. и средние вертикальные профили приращений температуры (\pm стандартное отклонение) над эпицентральной областью землетрясения в Китае, усредненные в периоды 16–19 мая и 20–22 мая 2021 г. (б)

Временные изменения предсейсмических возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере (UTLS)

Интенсивность аномальных изменений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере оценивалась путем вычисления интегральных параметров δT_C (δT). Максимальные значения параметра δT_C предвещали основные сейсмические события и выделялись на фоне более слабых возмущений.



Вариации скользящих дисперсий температуры в коротком (VAR_{STA}) и длинном (VAR_{LTA}) окне на уровнях 100 гПа (а) и 400 гПа (б) и соответствующие изменения параметров δT и δT_C (в) в апреле – мае 2008 г.

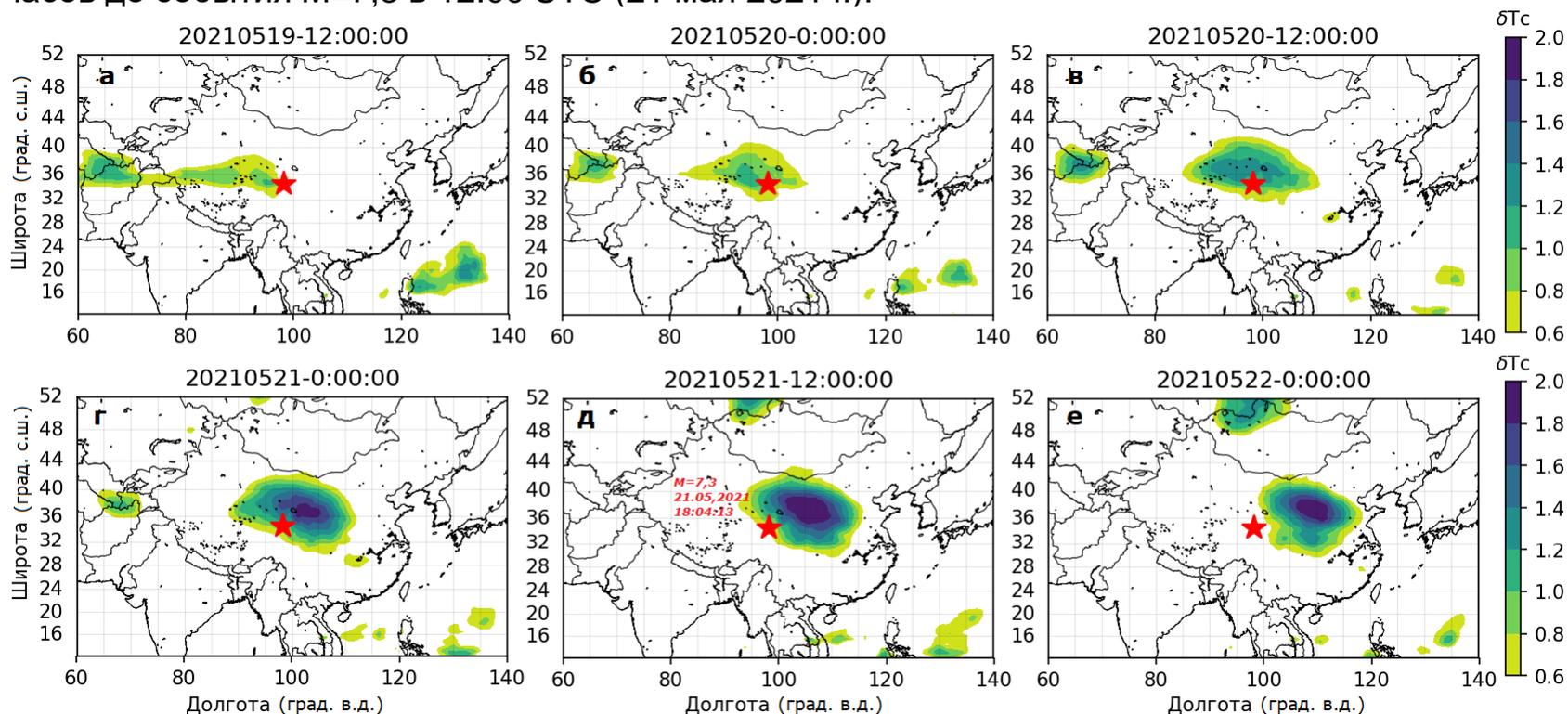


Временные ряды коэффициентов корреляции (r) между приращениями температуры ΔT на уровнях 400 и 100 гПа (а, б) и составляющими скорости ветра (V_N и V_E) на уровне 200 гПа (в, г) в апреле – июне 2008 г. и 2021 г.

Пространственно-временное распределение возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

Результаты расчета карт распределения параметра δT_C до, во время и после землетрясения в Китае показали, что область с максимальными значениями δT_C была локализована вблизи эпицентра предстоящего землетрясения $M=7,3$ и наблюдалось 20–22 мая 2021 г.

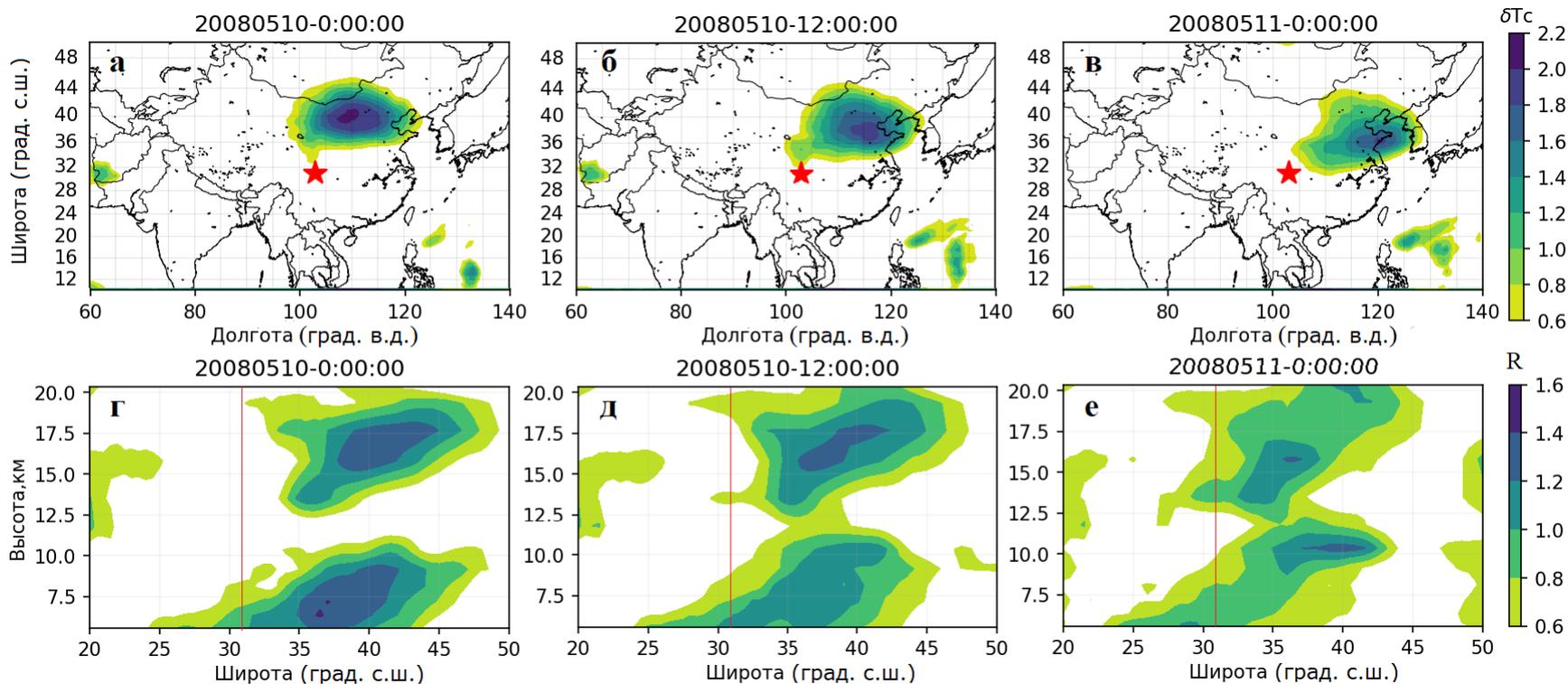
Положение мезомасштабного возмущения в пространстве оставалось практически неизменным на протяжении 18 часов (с 00:00 по 18:00 UTC 20 мая 2021 г.), а максимум наблюдался за ~6 часов до события $M=7,3$ в 12:00 UTC (21 мая 2021 г.).



Карты пространственного распределения интегрального параметра δT_C , рассчитанные через 12-часовые интервалы времени (00:00 и 12:00 UTC) в период с 19 по 22 мая 2021 г. Маркером показан эпицентр землетрясения $M=7,3$ ($34,60^\circ$ с.ш.; $98,25^\circ$ в.д.)

Пространственно-временное распределение возмущений температуры в верхней тропосфере и нижней стратосфере

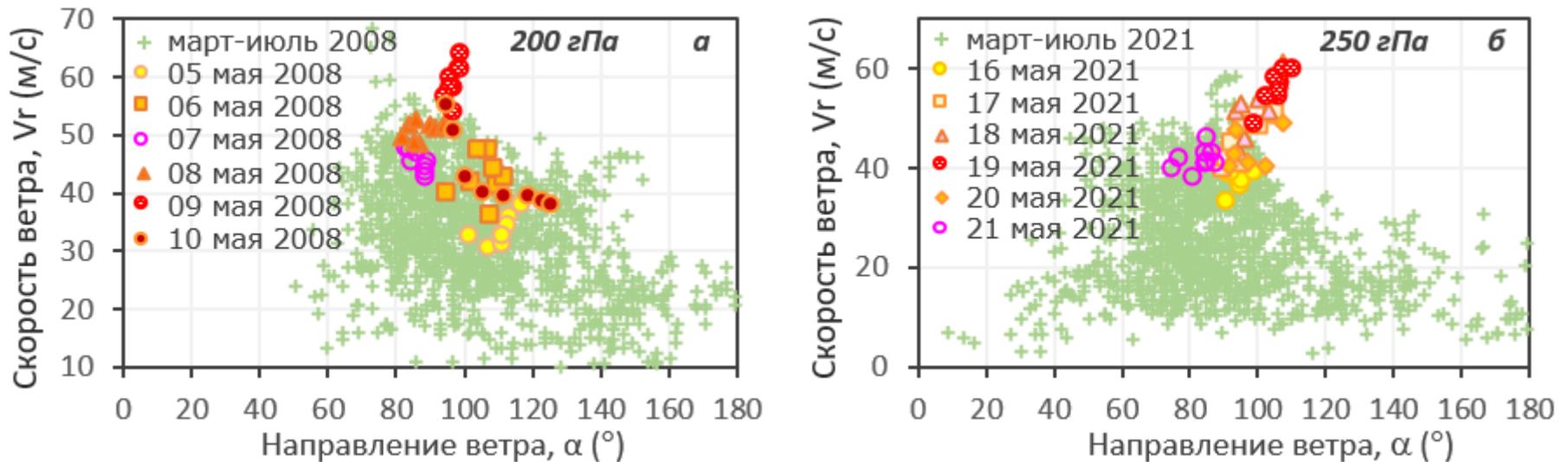
На рисунке приведены высотно-широтные сечения отношения $R=VAR_{STA}/VAR_{LTA}$, рассчитанные вдоль фиксированной долготы 104° в.д., которые демонстрируют развитие такого процесса перед событием 12 мая 2008 г. Динамический процесс в верхней тропосфере, начавшийся за несколько дней до сильного землетрясения (10–11 мая 2008 г.), характеризовался передачей энергии возмущения вверх до более разреженных (в 10–100 раз) слоев верхней тропосферы и нижней стратосферы.



Карты пространственного распределения интегрального параметра δT_C ($\delta T_C \geq 0,6$) (а, б, в) 10–11 мая 2008 г. и соответствующие им высотно-широтные сечения наблюдаемых отношений $R=V_{STA}/V_{LTA} \geq 0,6$ вдоль фиксированной долготы 104° в.д. (г, д, е). Красная линия – координата эпицентра землетрясения $M=7,9$ (12.05.2008; $31,00^\circ$ с.ш.; $103,32^\circ$ в.д.)

Предсейсмические аномалии скорости ветра

Важными элементами динамики ветрового режима в верхней тропосфере в средних широтах являются струйные течения, которые хорошо выражены в диапазоне высот 9–15 км (300–150 гПа) с максимумом скоростей на уровне 200–250 гПа (~11 км). Для исследования полей атмосферного ветра над эпицентрными областями землетрясений в Китае были построены пятимесячные (март–июль 2008 г. и 2021 г.) распределения значений модуля вектора скорости ветра (V_R) для различных его направлений (α), рассчитанные по двум горизонтальным компонентам на уровнях 250 и 200 гПа. Общей особенностью распределений являлось то, что максимумы V_R примерно приходились на восточное направление (~90°). Однако точки данных V_R и α , характеризующие изменения ветра в предсейсмические периоды и выделенные красными маркерами (08–09 мая 2008 г. и 18–19 мая 2021 г.), демонстрировали особый характер поведения. В обоих случаях за ~2 суток до землетрясений наблюдалось увеличение модуля вектора скорости ветра V_R до 55–65 м/с при одновременном изменении направления на ~5–15°.



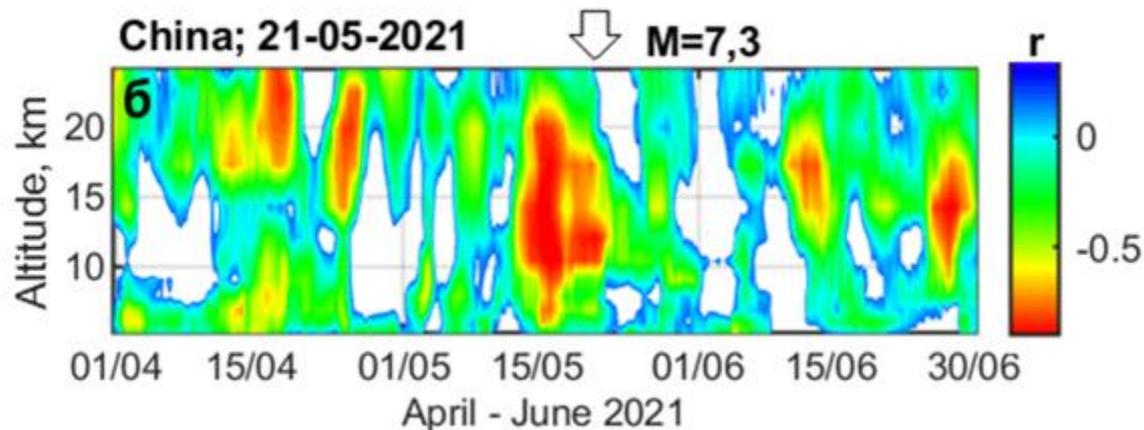
Распределение значений модуля скорости ветра для различных его направлений на уровнях 250 и 200 гПа вблизи эпицентров землетрясений в марте – июле 2008 г. (а) и 2021 г. (б).

Цветными маркерами отмечены данные измерений за 5–6 дней до событий $M > 7,0$

Пространственно-временные изменения взаимосвязи между компонентами горизонтальной скорости ветра

Влияние сильной сейсмической активности на состояние нижней атмосферы проявлялось не только в динамике метеопараметров, но и в изменении взаимосвязи между ними. Примером может служить анализ корреляционной связи между вариациями меридиональной $V_N(t)$ и зональной $V_E(t)$ составляющими скорости ветра.

На рисунке представлена высотно-временная диаграмма коэффициента корреляции между компонентами скорости ветра за 3 месячный период (в апреле – июне 2021 г.).



Высотно-временные распределения отрицательных значений коэффициента корреляции в Китае (апрель – июнь 2021 г.) (6)

Выводы

В дополнение к ранее выполненным исследованиям приведены результаты анализа данных спутникового дистанционного зондирования температурного и ветрового режима в периоды подготовки двух разрушительных землетрясений в Китае с магнитудами $M=7,9$ (12 мая 2008 г.) и $M=7,3$ (21 мая 2021 г.). В качестве главных предсейсмических признаков в поведении параметров, рассматривались противоположные по знаку аномальные короткопериодные изменения температуры и вариации скорости ветра, происходящие в верхней тропосфере и области тропопаузы. Возмущения температуры, горизонтальный размер которых составлял ~ 1000 км, и скорости ветра отчетливо наблюдались за 1–2 суток до событий. Установлено, что горизонтальные движения воздушных масс играют важную роль в развитии возмущений температуры, которые проявляются непосредственно перед сейсмическими событиями. Важным результатом является сходство выделенных возмущений метеопараметров в обоих анализируемых случаях, что, вероятно, может служить проявлением реакции различных слоев атмосферы на процессы, происходящие в литосфере при подготовке землетрясений. Полученные результаты дают основания считать, что генерация АГВ является одним из важных факторов, влияющих на изменение температуры и горизонтальной скорости ветра, которые наблюдаются непосредственно перед крупными сейсмическими событиями.

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.



Научная станция РАН в г. Бишкеке и ее окрестности

Спасибо за внимание!

Thank you for attention!