

Обнаружение смещений поверхности в результате землетрясения в Марокко 08.09.2023 методом радиолокационной интерферометрии

Захарова Л.Н.

ФИРЭ им. В.А. Котельникова РАН

Фрязино



Лебедева М.А.

Институт земной коры СО РАН

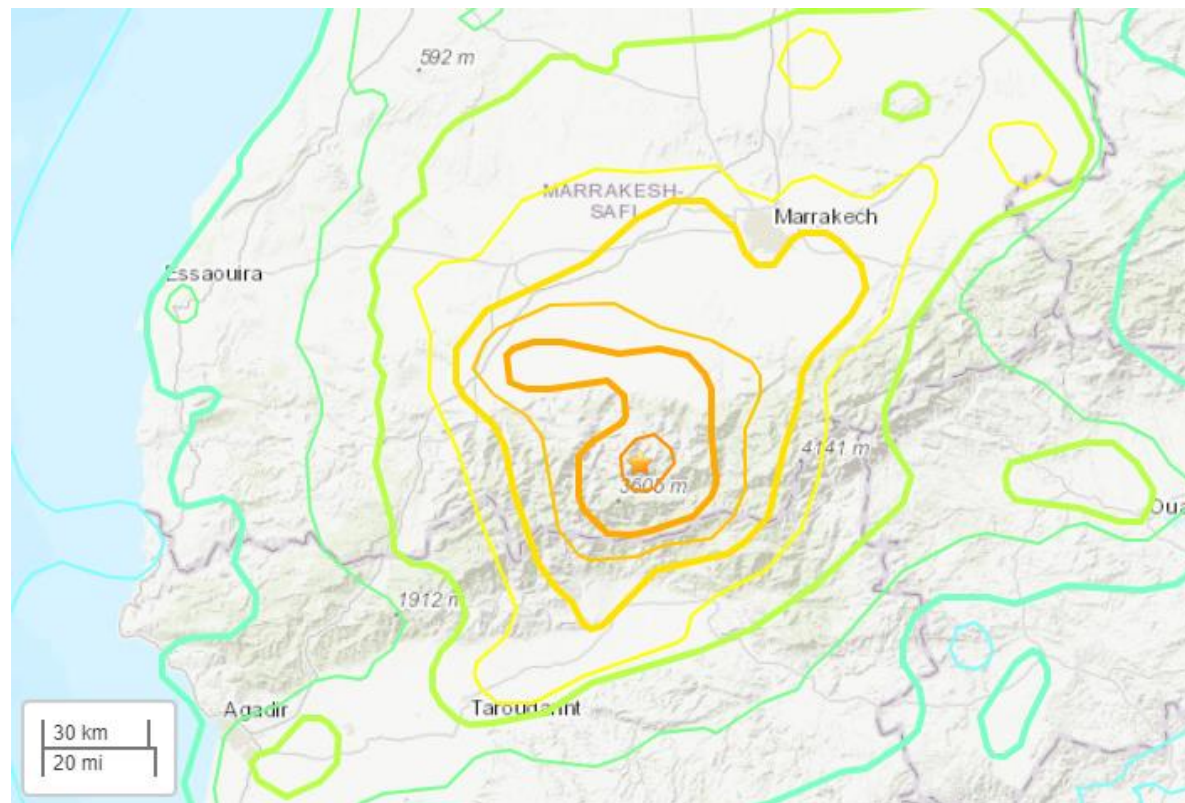
Иркутск





Характеристики землетрясения

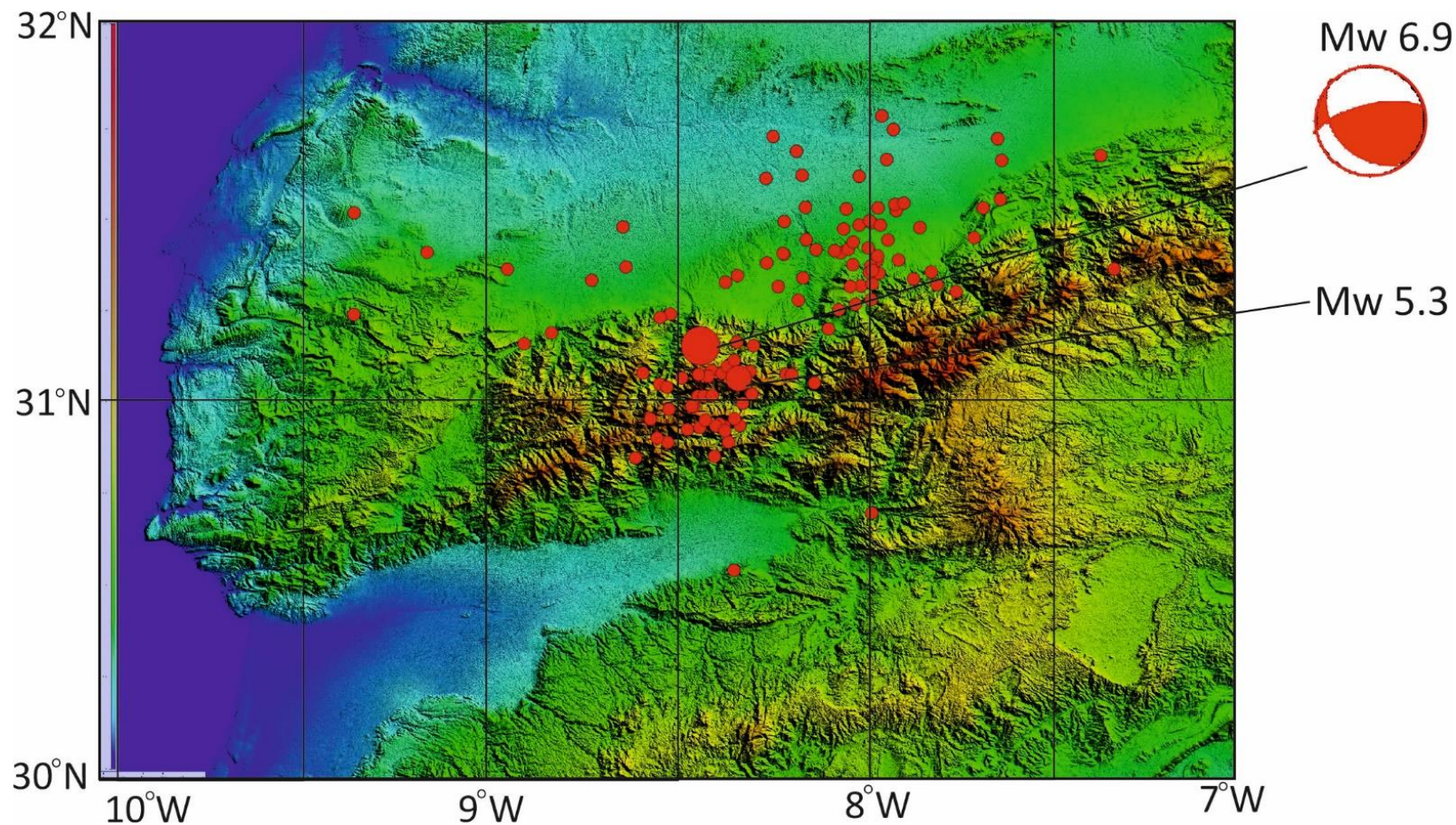
- Дата: 8 сентября 2023 г.
- Время: 22:11 UTC
- Магнитуда (M_w): 6.9 по данным Международного сейсмологического центра (ISC)
- Глубина очага: 10-18 км (разные службы)
- Фокальный механизм: взброс.
- Афтершоки: сотни в течение сентября-ноября, магнитуда сильнейшего 5.3.
- Интенсивность (иллюстрация справа): USGS, версия 6 ноября 2023



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+



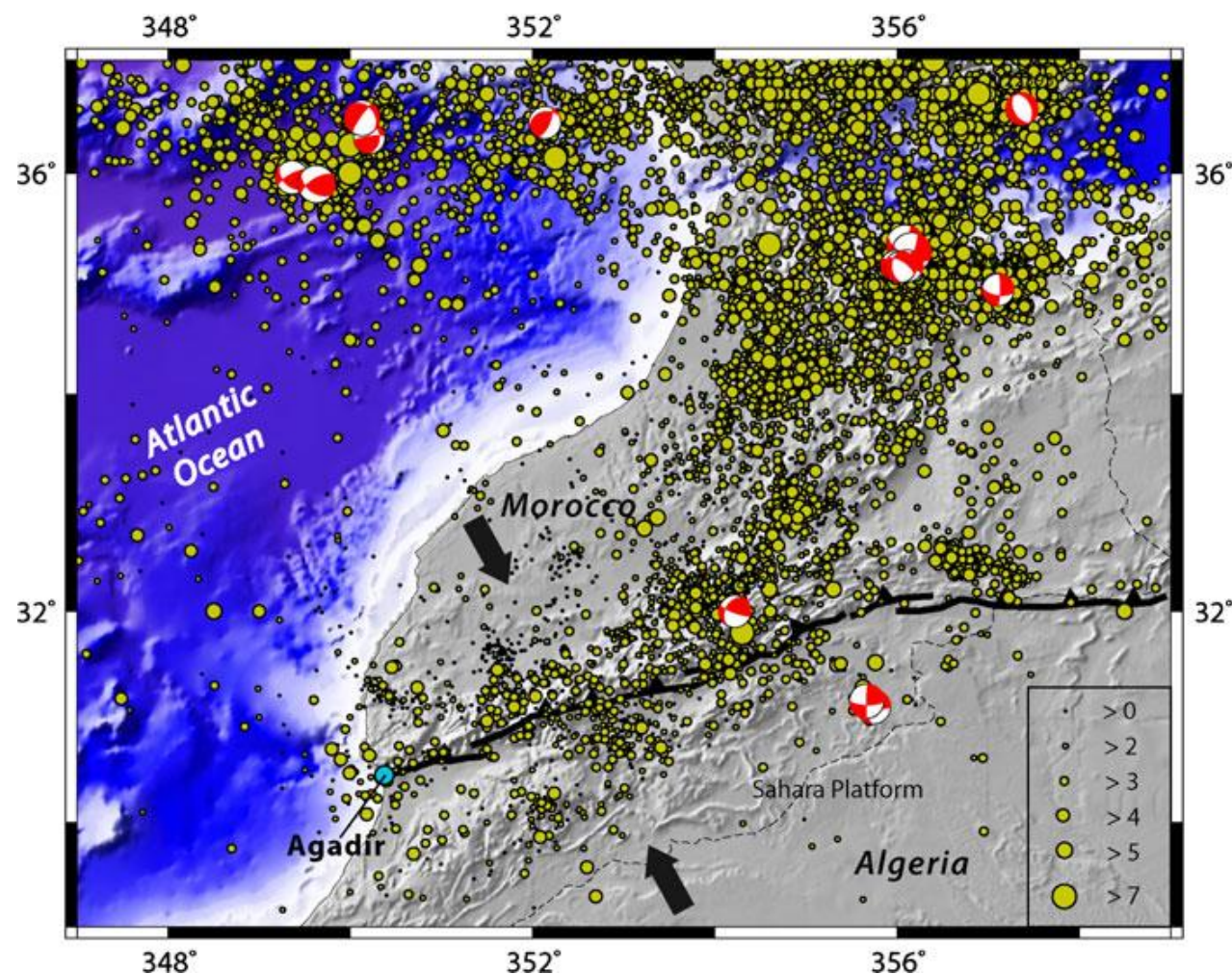
Эпицентры землетрясений исследуемого района в период 8.09.2023 – 10.11.2023



Источник: ISC <http://isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/>



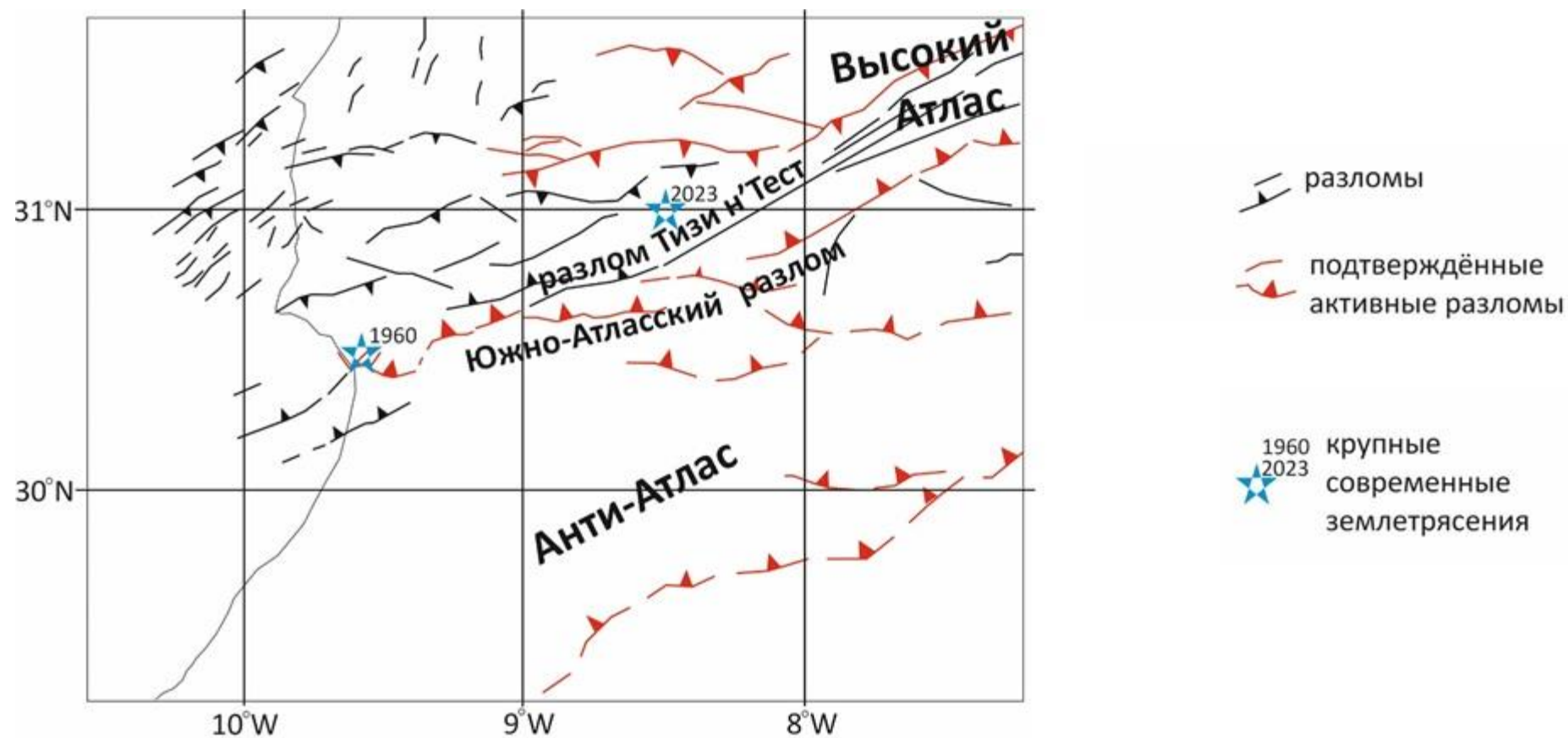
Южно-Атласский надвиговый фронт



Наиболее высокая сейсмичность наблюдается в северной части Марокко, что вызвано границей взаимодействия Африканской и Евразийской плит. Однако в 1960 году в западной части Южно-Атласского разлома, в районе г. Агадир, произошло разрушительное землетрясение с магнитудой $M_w = 5.9$. Так же, как и землетрясение 8 сентября 2023 г., оно произошло в зоне влияния Южно-Атласского надвигового фронта, который является структурной границей между горными массивами Атласа и относительно стабильной платформой Сахара в области ССВ-ЮЮЗ сжатия (Timoulali, Meghraoui, 2011).



Схема разломов южного Высокого Атласа*



* по данным Sébrier M., Siame L., Zouine E.M., Winter T., Missenard Y., Leturmy P. // Active tectonics in the Moroccan High Atlas // C. R. Geoscience, 2006. Vol. 338. P. 65–79. DOI: 10.1016/j.crte.2005.12.001



Разломы Тизи н'Тест и Южно-Атласский

Тизи н'Тест

Разлом расположен в 20 км от эпицентра землетрясения. Имеет северо-восточное простирание. Исследователи отмечают смену геодинамических режимов в зоне разлома в разные периоды: в кембрии разлом ограничивал грабен и характеризовался как сброс, впоследствии развивался как левосторонний и правосторонний сдвиг, в миоцене и плиоцене разлом приобретает взбросовый характер, который наблюдается до настоящего времени по сейсмологическим данным.

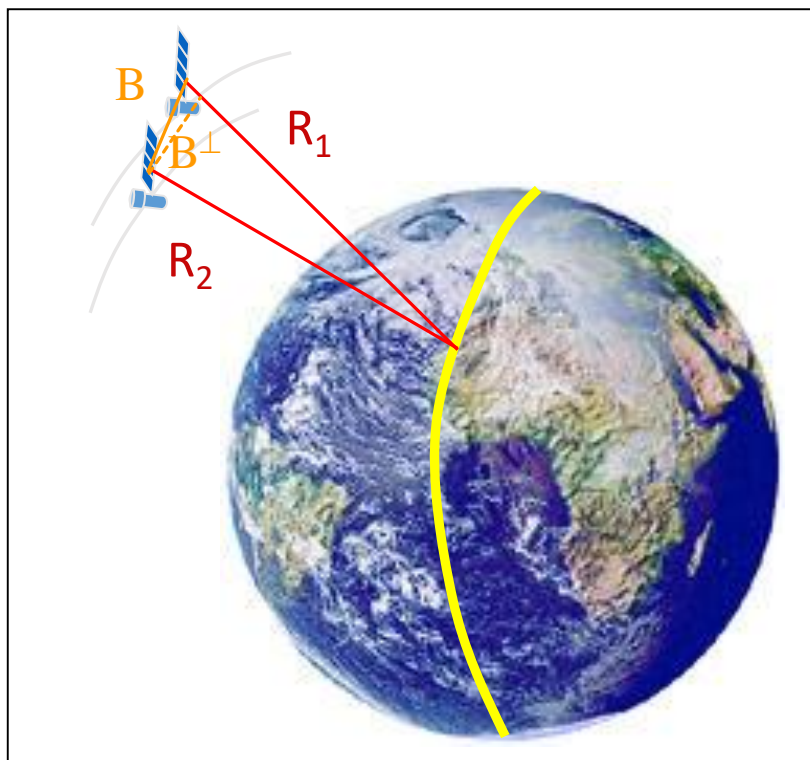
Южно-Атласский

Ранее исследователями обсуждался сейсмический потенциал Южно-Атласского разлома с максимальными магнитудами землетрясений, M_w , в диапазоне от 6,1 до 6,4 (Sébrier et al, 2006).

Реализовавшееся смещение в зоне разлома Тизи н'Тест, который расположен севернее Южно-Атласского разлома, по-видимому, разгрузило накопленное напряжение. Необходимо дополнительное исследование взаимодействия этих двух разломных структур.



Метод радиолокационной интерферометрии

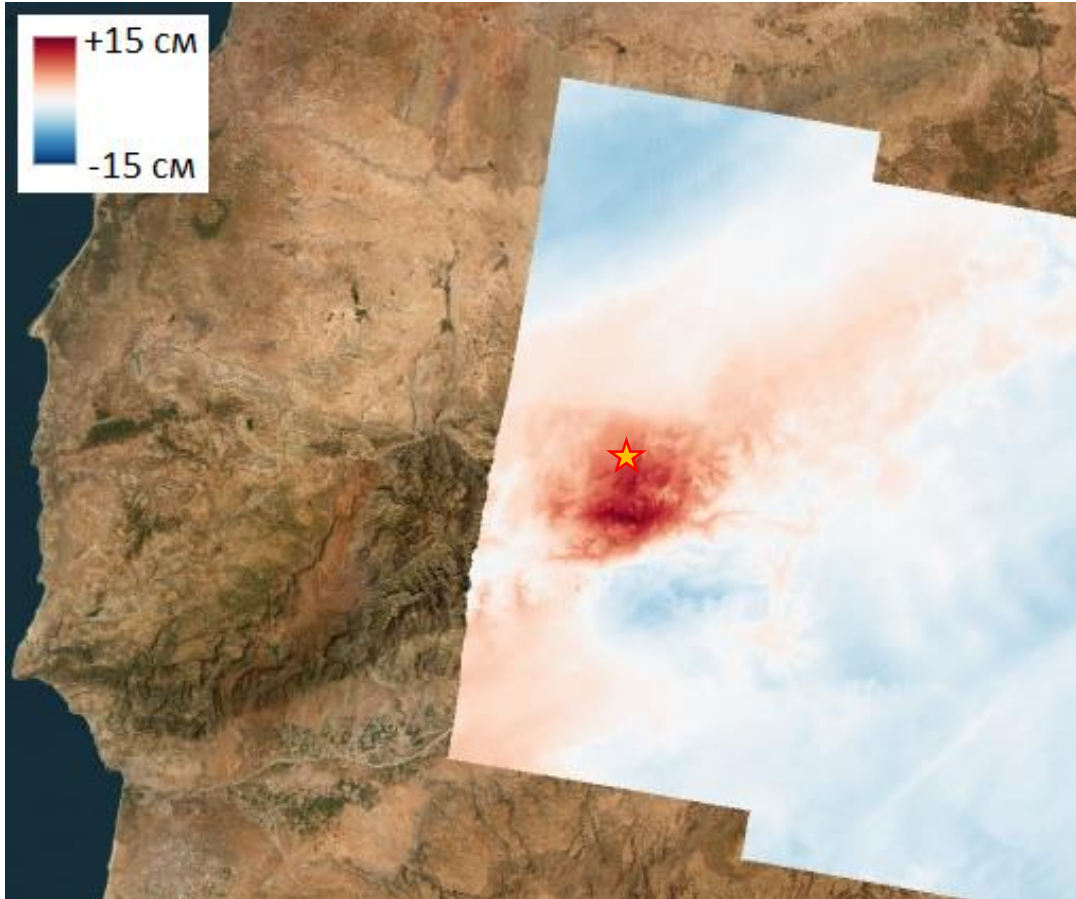


- Для измерения подвижек используется съёмка с повторяющихся орбит
- Разность фаз несёт информацию о высоте рельефа и смещении за время между съёмками:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_{\text{рельеф}} + \Delta\varphi_{\text{смещ}} + \Delta\varphi_{\text{помехи}} = -\frac{4\pi B^\perp h}{\lambda r \sin \alpha} - \frac{4\pi d}{\lambda} + \Delta\varphi_{\text{помехи}}$$

- B^\perp – перпендикулярная составляющая базы интерферометра B
- h – высота рельефа в точке съёмки
- r – наклонная дальность до точки съёмки
- λ – длина волны радиолокатора
- α – угол обзора
- d – проекция смещения поверхности за время между съёмками на линию визирования

Опубликованные результаты интерферометрической обработки NASA* (съёмка с одного витка)



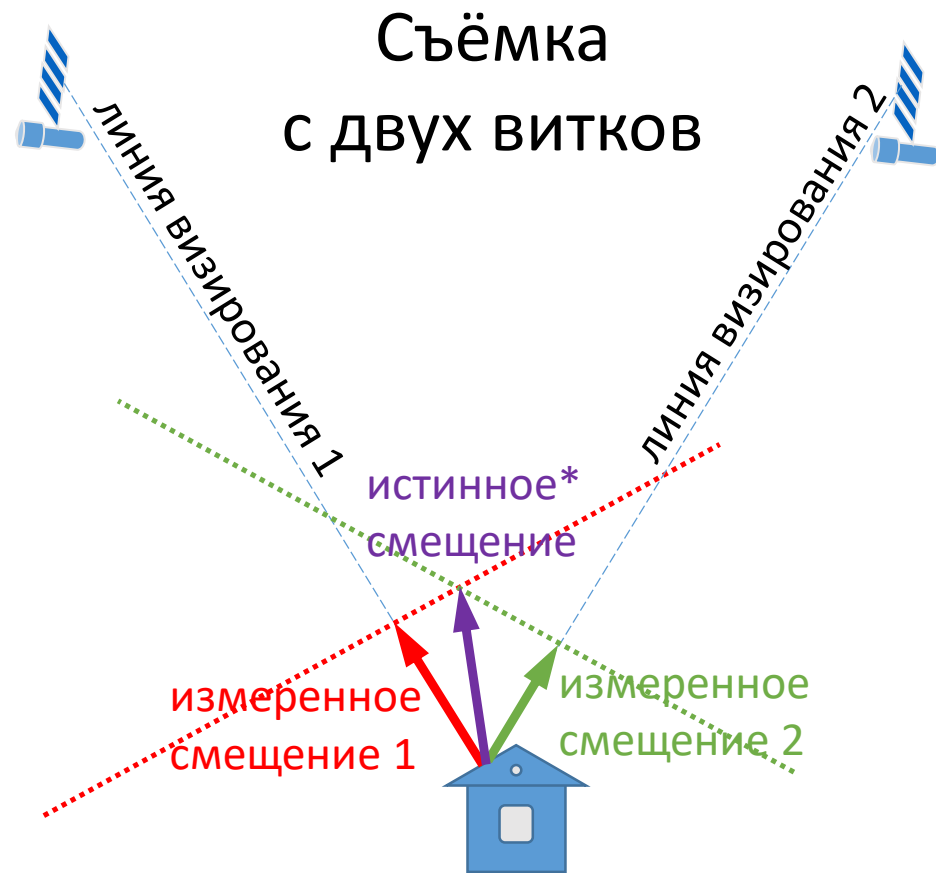
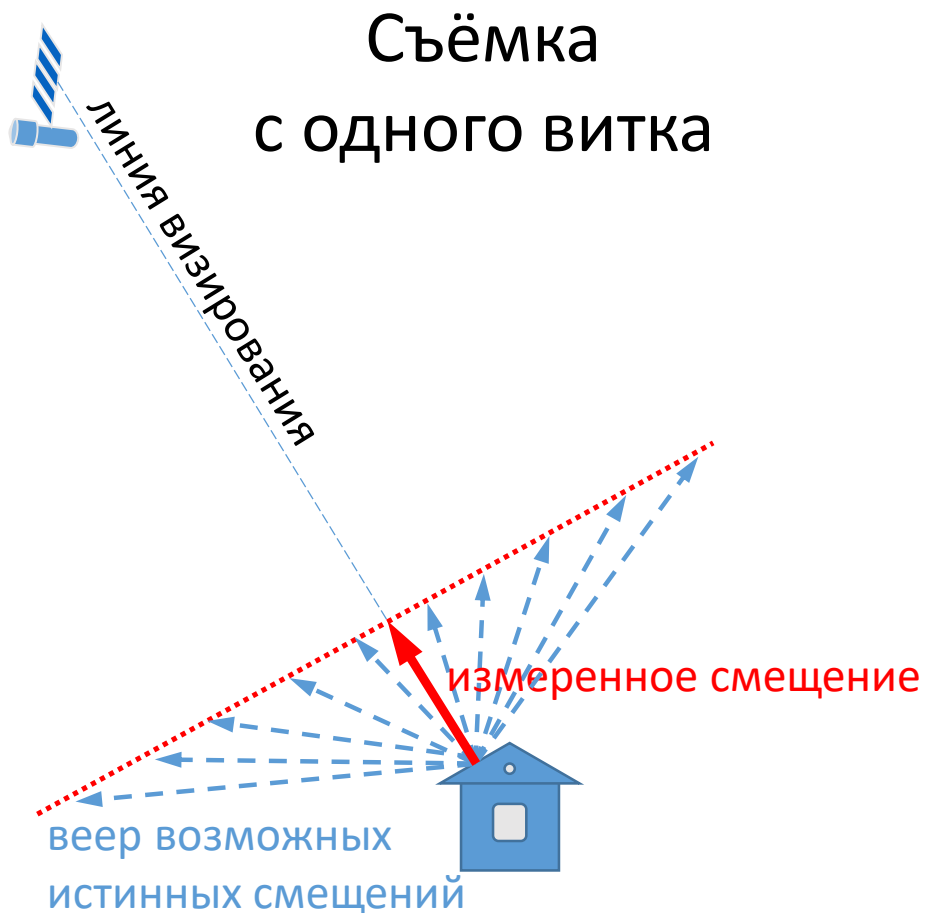
- Обработка: NASA
- Данные: Sentinel-1, нисходящий виток (съёмка с востока)
- Даты съёмок:
 - 30 августа (10 дней до события)
 - 11 сентября (сутки после события)
- Выявленные смещения:
 - до **15 см** в направлении **на** спутник на северном крыле
 - до **7 см** в направлении **от** спутника на южном крыле

*Источник:

<https://maps.disasters.nasa.gov/arcgis/apps/MinimalGallery/index.html?appid=65464289c636499fb755bc359b1c99fc>



Преимущества совместной обработки пары интерферограмм с противоположных витков

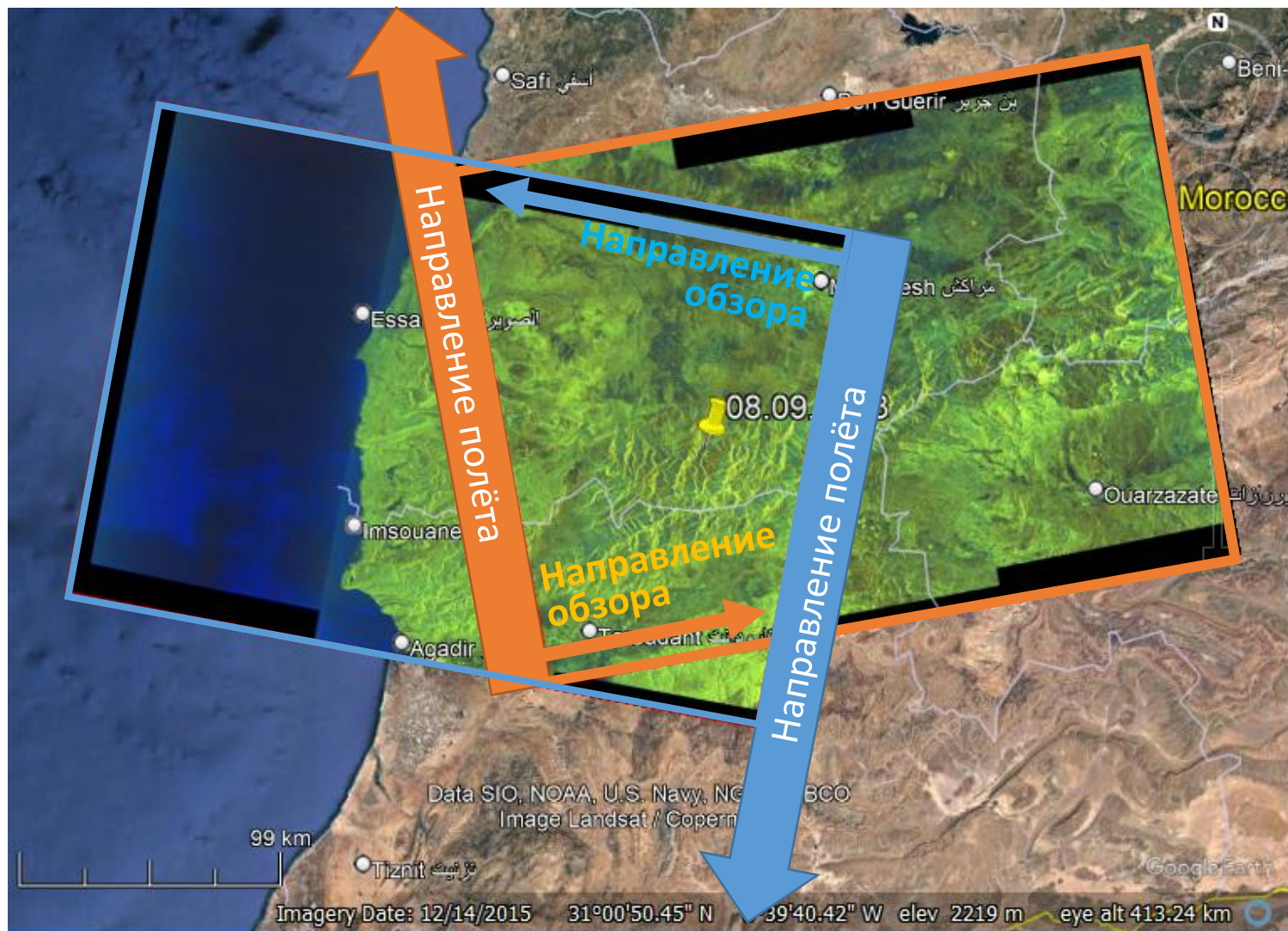


* с точностью до неизвестной составляющей в направлении север-юг



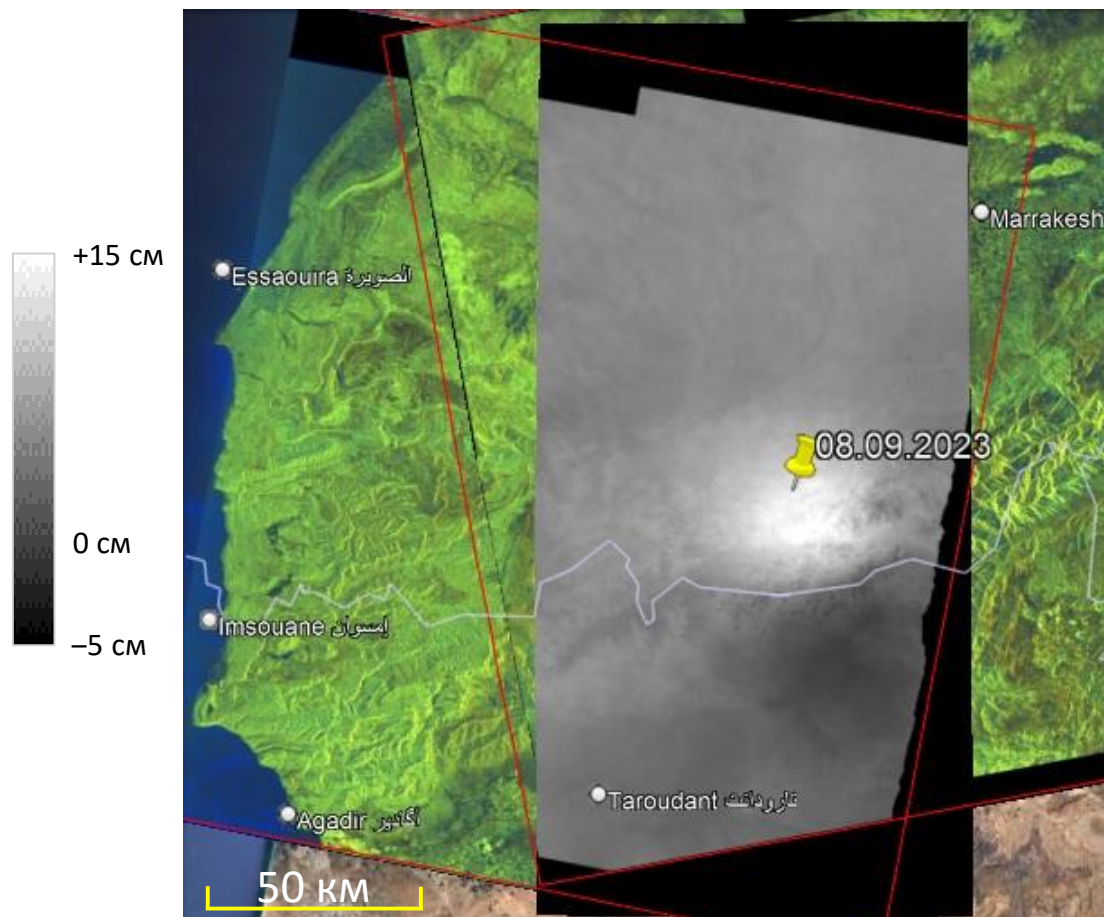
Использованные данные Sentinel-1A

- С-диапазон
(длина волны 5.6 см)
- **Восходящий виток:**
 - 3.09.2023 18:33 UTC
 - 15.09.2023 18:33 UTC
- **Нисходящий виток:**
 - 4.09.2023 6:37 UTC
 - 16.09.2023 6:37 UTC
- Интервал: 12 суток

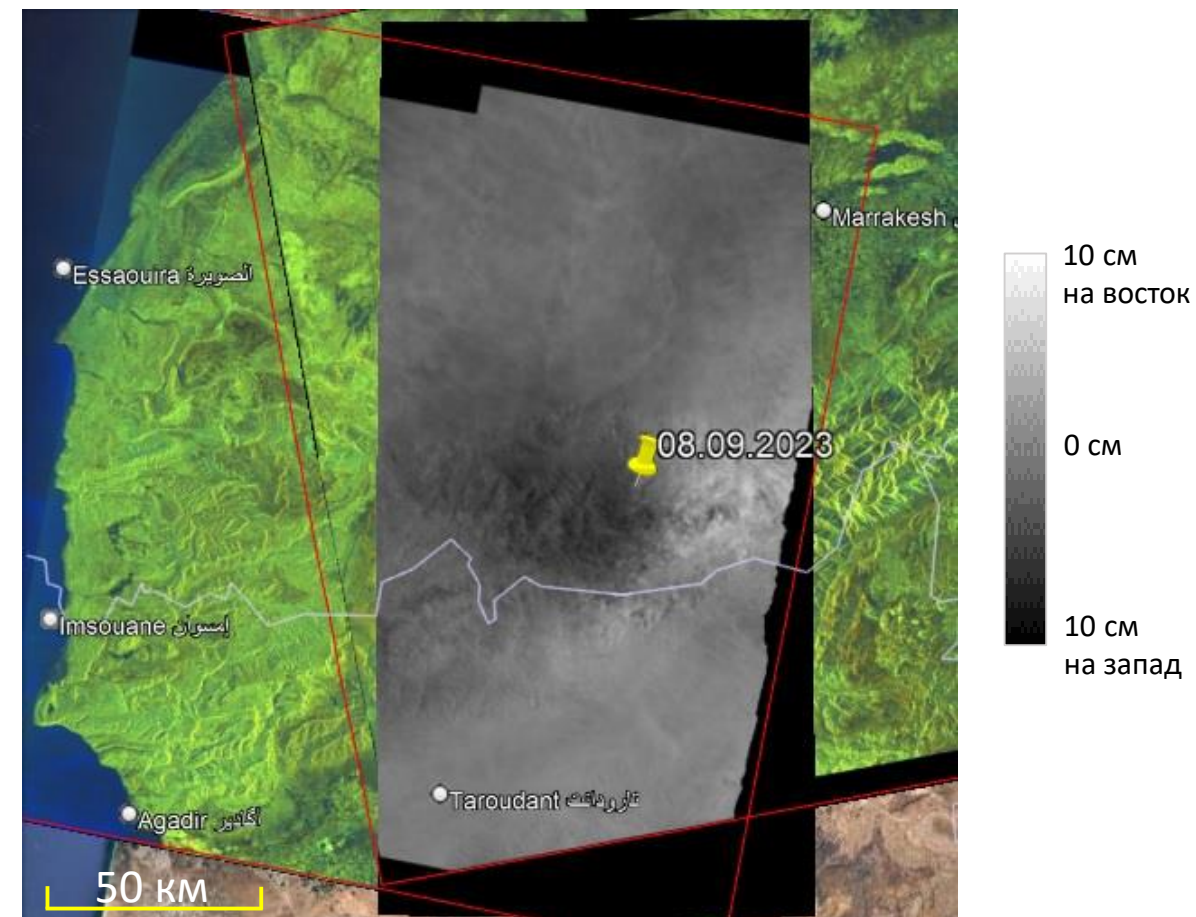




Результаты: съёмка с двух витков



Вертикальная составляющая смещения

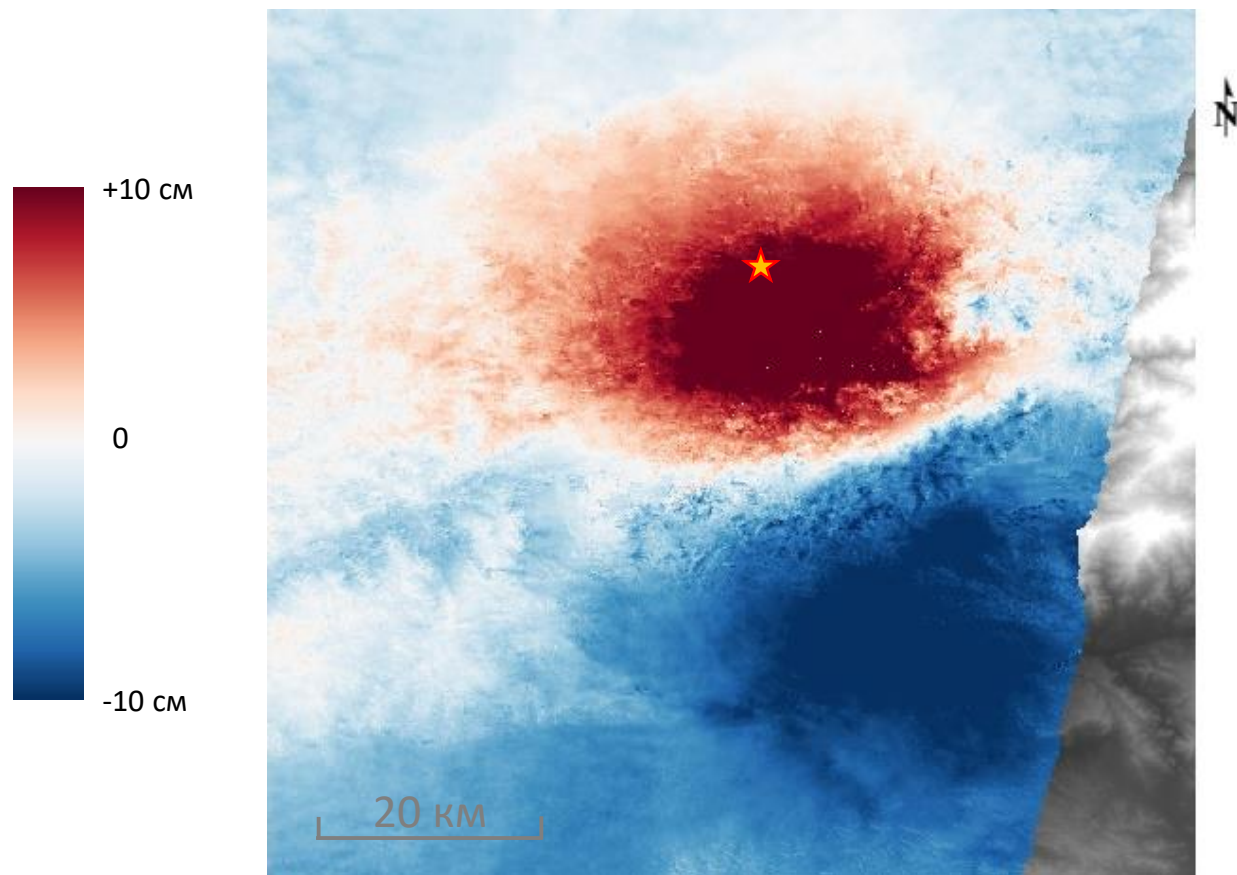


Горизонтальная составляющая смещения
(в широтном направлении)

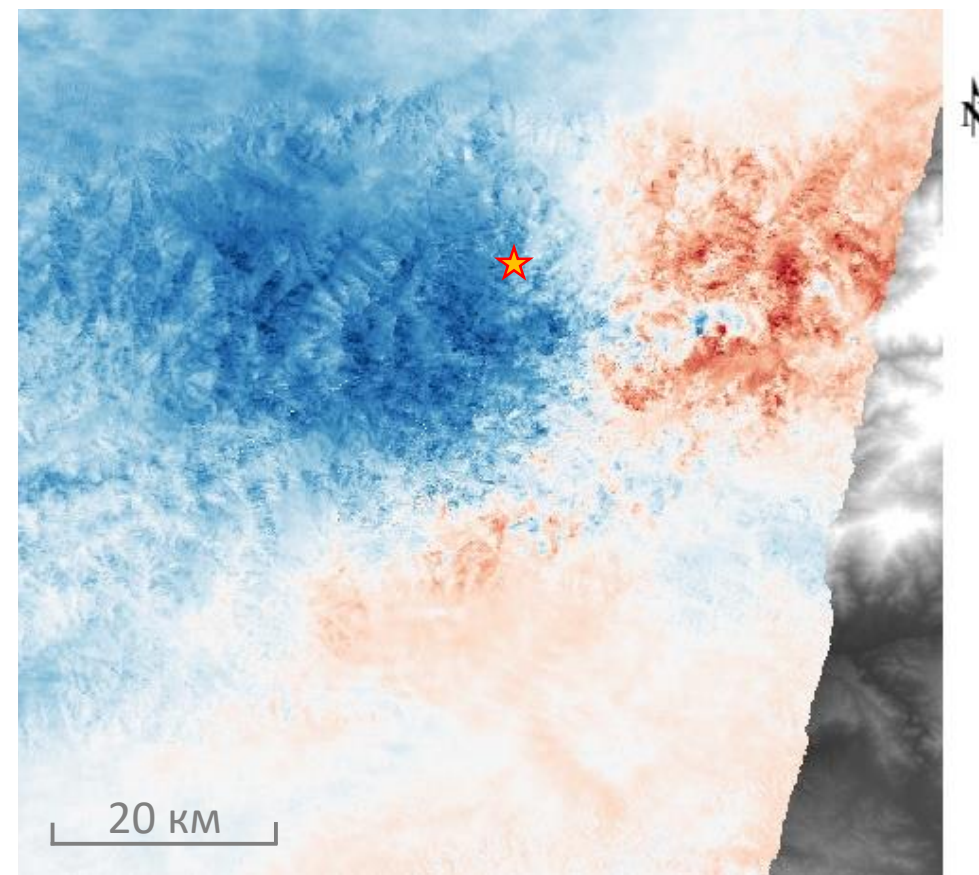


Результаты: окрестности эпицентра

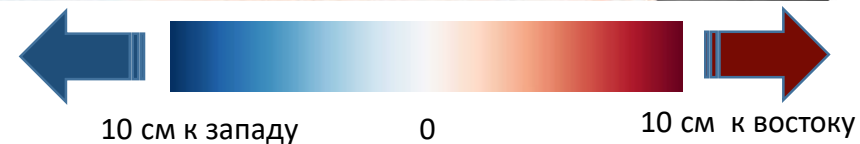
Вертикальные смещения



Смещения в направлении З-В



★ Эпицентр землетрясения 08.09.2023

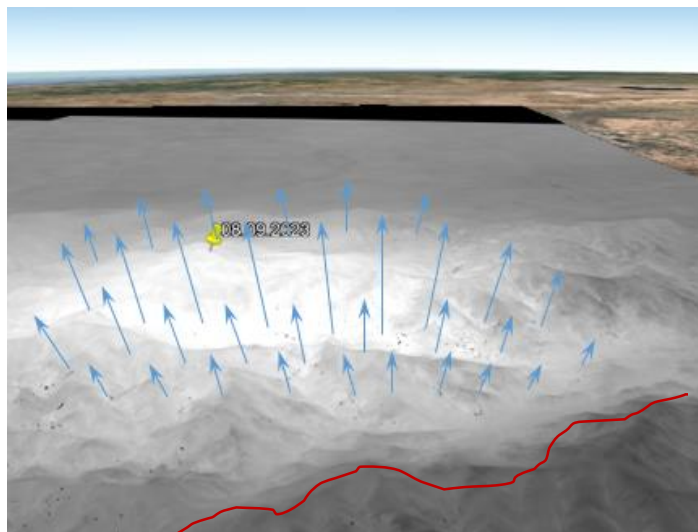




Величины максимальных смещений на поверхности

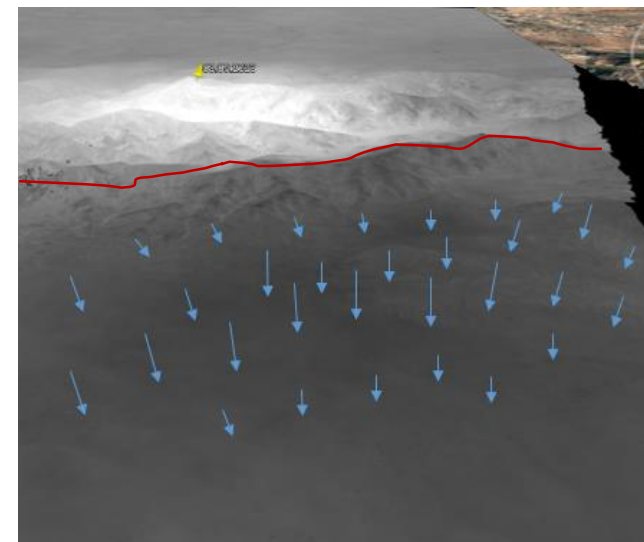
Северное крыло

- По вертикали:
 - 16 см вверх
- По горизонтали:
 - 10 см на запад
 - 10 см на восток



Южное крыло

- По вертикали:
 - 8 см вниз
- По горизонтали:
 - 3 см на запад
 - 3 см на восток





Заключение

- Смещения земной поверхности, наблюдаемые на интерферограммах, приурочены к зоне разлома Тизи н'Тест.
- Распределение горизонтальных и вертикальных смещений на интерферограммах свидетельствует о надвигании северо-западного крыла разлома на юго-восточное.
- Масса пород висячего блока испытывает воздымание и веерообразное распределение материала. Материал лежащего блока погружается с образованием воронкообразной структуры.
- За интервалы между съёмками обработанных пар изображений произошло около 75 сейсмических событий, среди которых главный толчок и афтершоки. Уточнение механизма как главного события, так и последовавших, требует дальнейшего изучения.