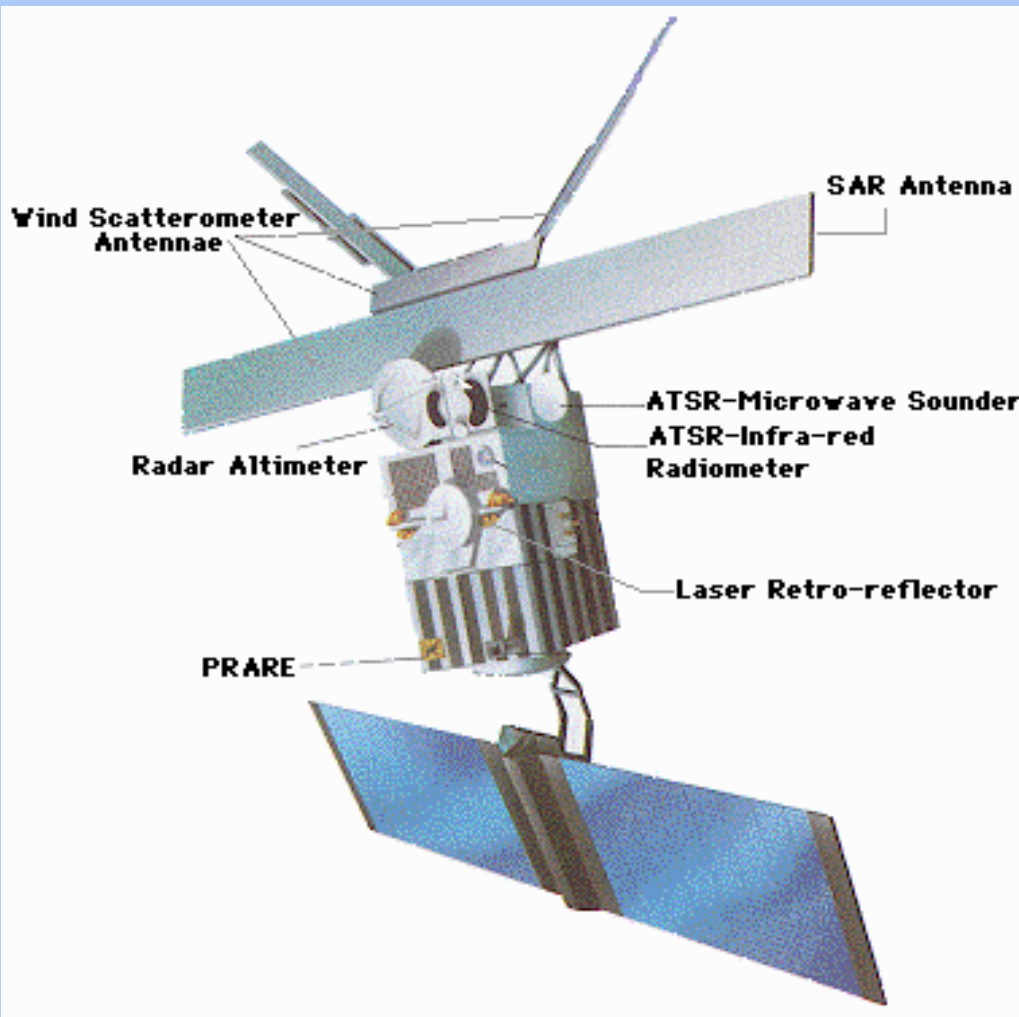


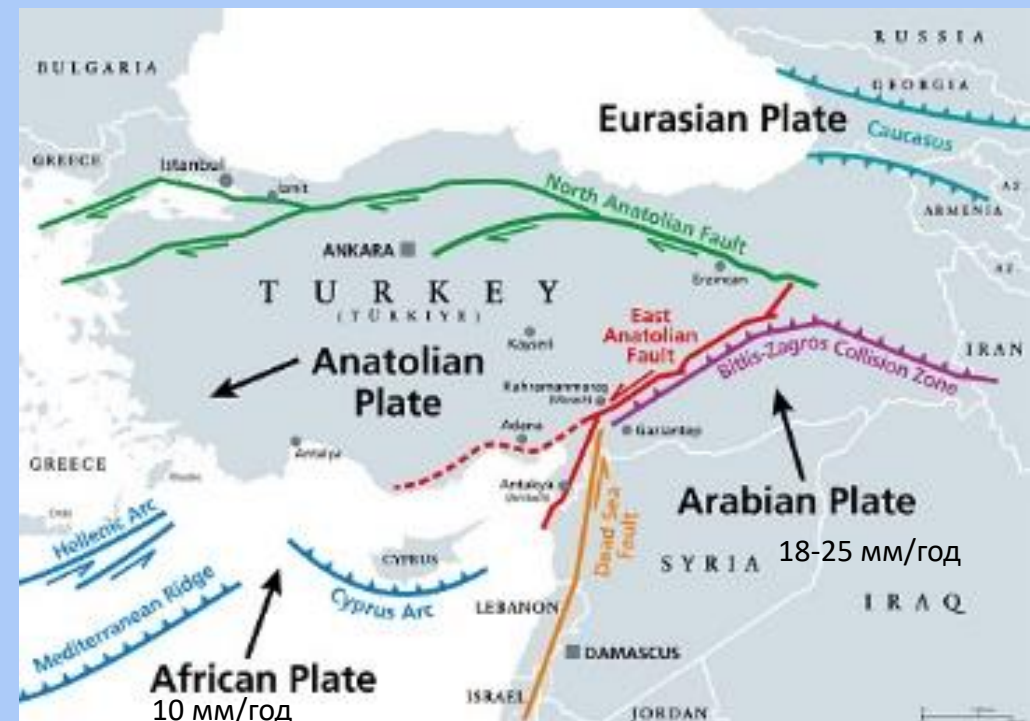
Смещения земной поверхности в области землетрясения в Турции 06.02.2023 на косейсмическом и постсейсмическом этапе и модель сейсмического разрыва по данным спутниковой радарной интерферометрии



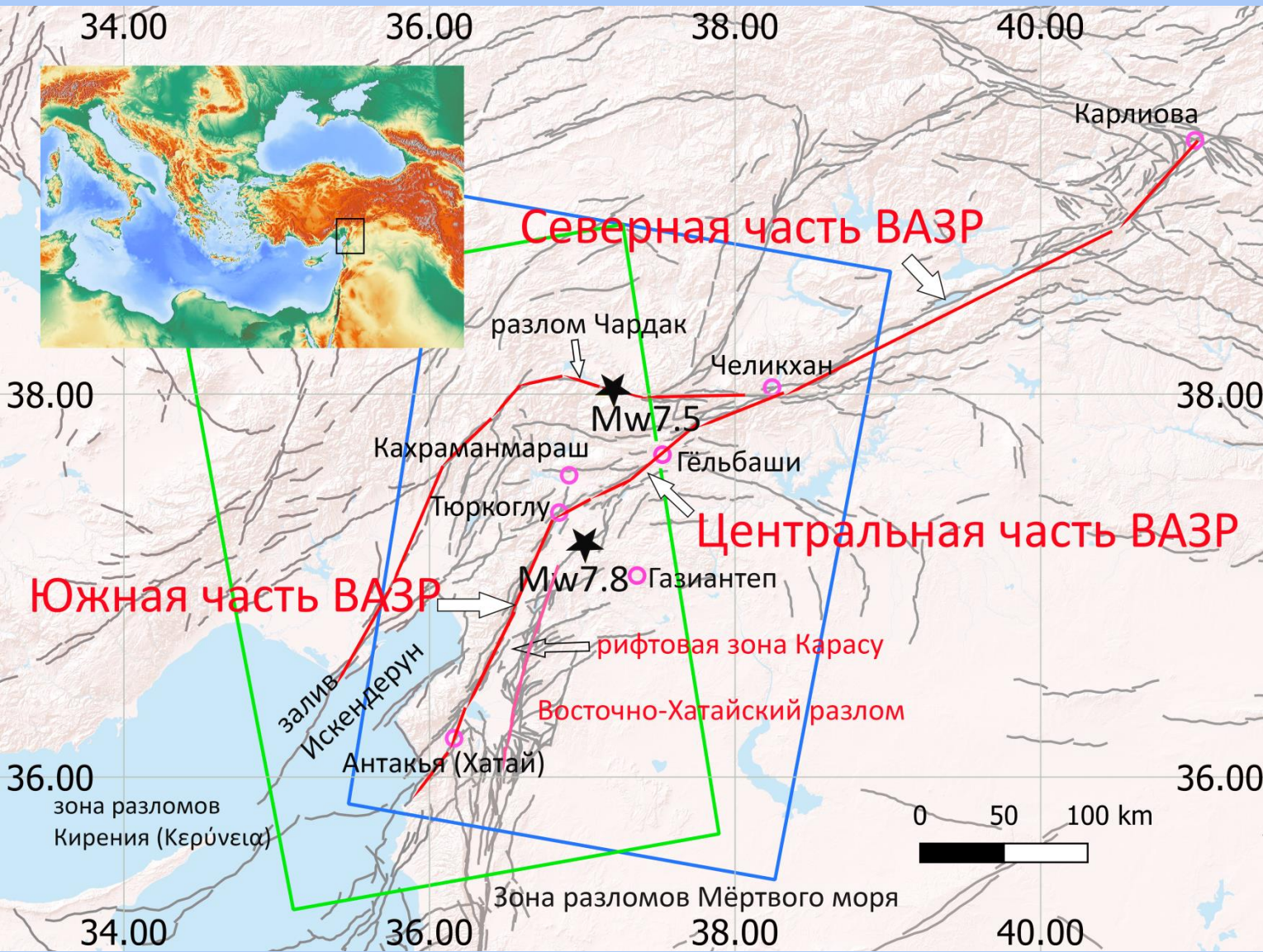
В.О. Михайлов¹, И.П. Бабаянц¹, М.С. Волкова^{1,*}, Е.П. Тимошкина¹, В.Б. Смирнов^{2,1}

¹ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Б. Грузинская 10, Москва, Россия

² Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, Воробьевы горы, 1, Москва, Россия



Тектоническая позиция землетрясения 06.02.2023



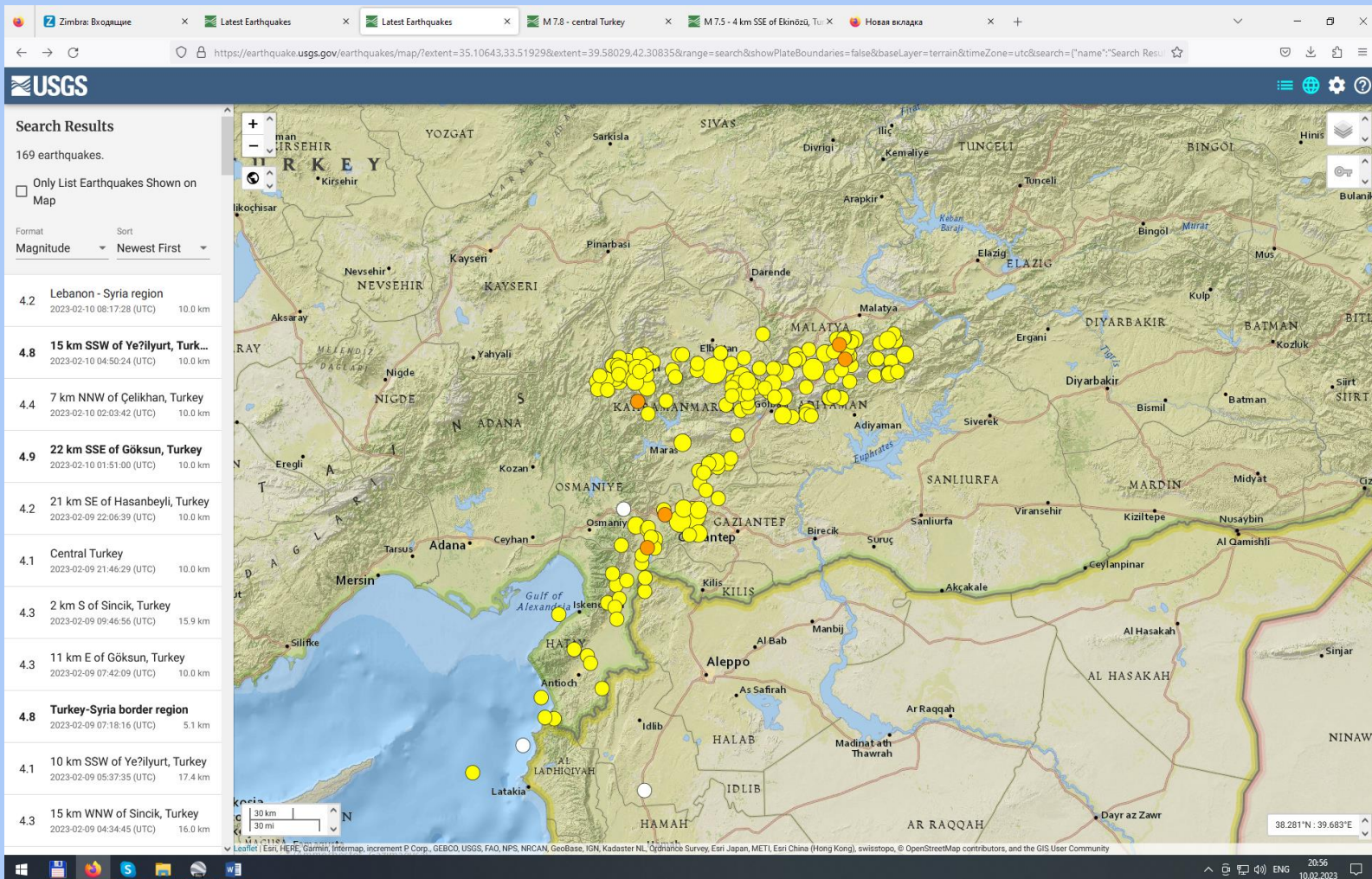
6 февраля 2023 года на юге Турции вблизи границы с Сирией произошла серия катастрофических землетрясений. Первое землетрясение с магнитудой $M_w=7.8$ (данные Геологической службы США, USGS) было зафиксировано в 01:17:34 (UTC). Координаты гипоцентра определены как $37.225N, 37.021E$, на 35 км западнее города Газиантеп (на границе провинции Кахраманмараш) на глубине 17.5 км.

Район Турции, где произошли землетрясения, находится на стыке Аравийской, Африканской и Анатолийской плит. В этом районе расположены основные тектонические разломы: Северо-Анатолийская зона разломов, отделяющая Анатолийскую плиту от Евразийской и Восточно-Анатолийская зона разломов. Из-за такой тектонической обстановки центральная часть Турции проявляет чрезвычайную сейсмическую активность.

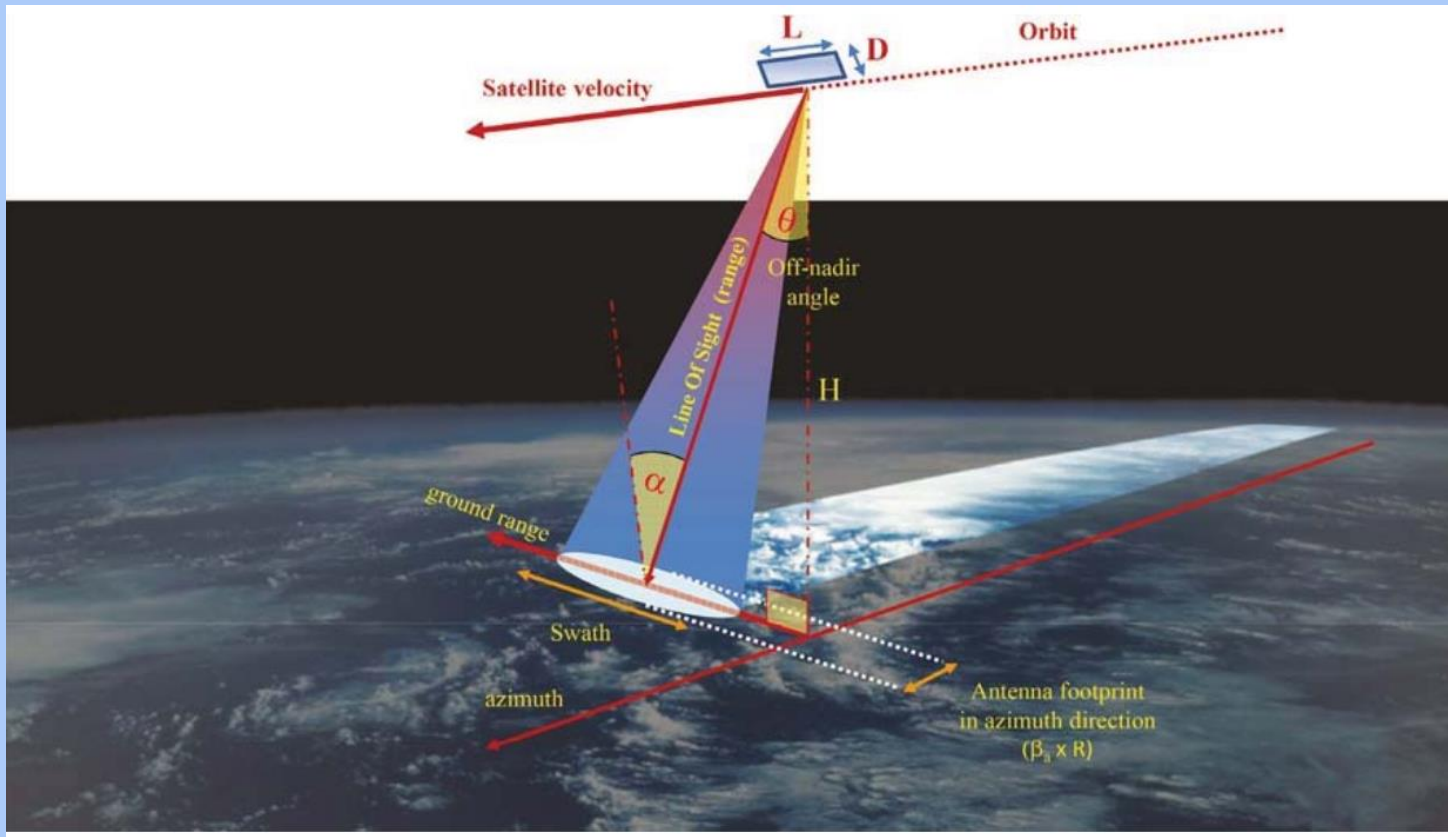
Эпицентры землетрясений в феврале 2023 г по данным Геологической службы США (USGS)

Первый эпицентр располагается на небольшом разломе отходящем на ЮЗ от Восточно-Анатолийской зоны разломов (далее ВАЗР). По данным USGS поверхность разрыва достигла ВАЗР и двинулась на северо-восток и юго-запад на расстояние более 100 км в обоих направлениях. Спустя 9 часов, в 10:24:49 (UTC), произошло второе крупное землетрясение на разломе Сюргу-Чардак (Sürgü-Çardak) с магнитудой $M_w=7.5$, с эпицентром 38.024N, 37.203E в районе населенного пункта Экинёзю (Ekinözü, провинция Кахраманмараш), примерно на 90 километров севернее от эпицентра первого события.

<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/>



Оценка смещений земной поверхности по снимкам спутниковых радаров с синтезированной апертурой



Спутниковая радарная интерферометрия является эффективным методом определения смещений земной поверхности с точностью порядка 1 см. Съёмка не зависит от времени суток, освещенности, погодных условий.

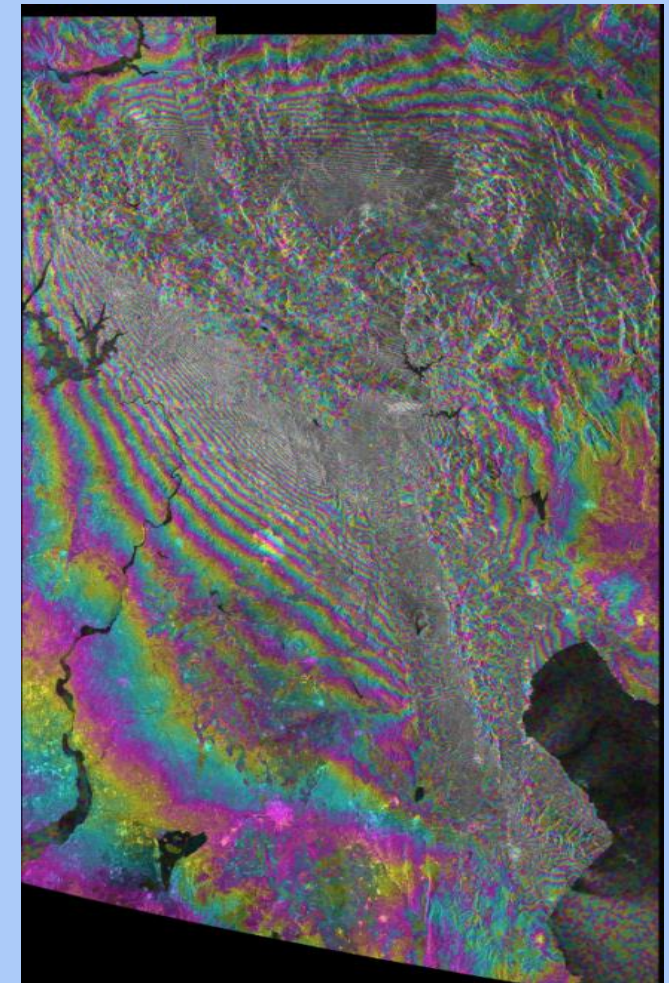
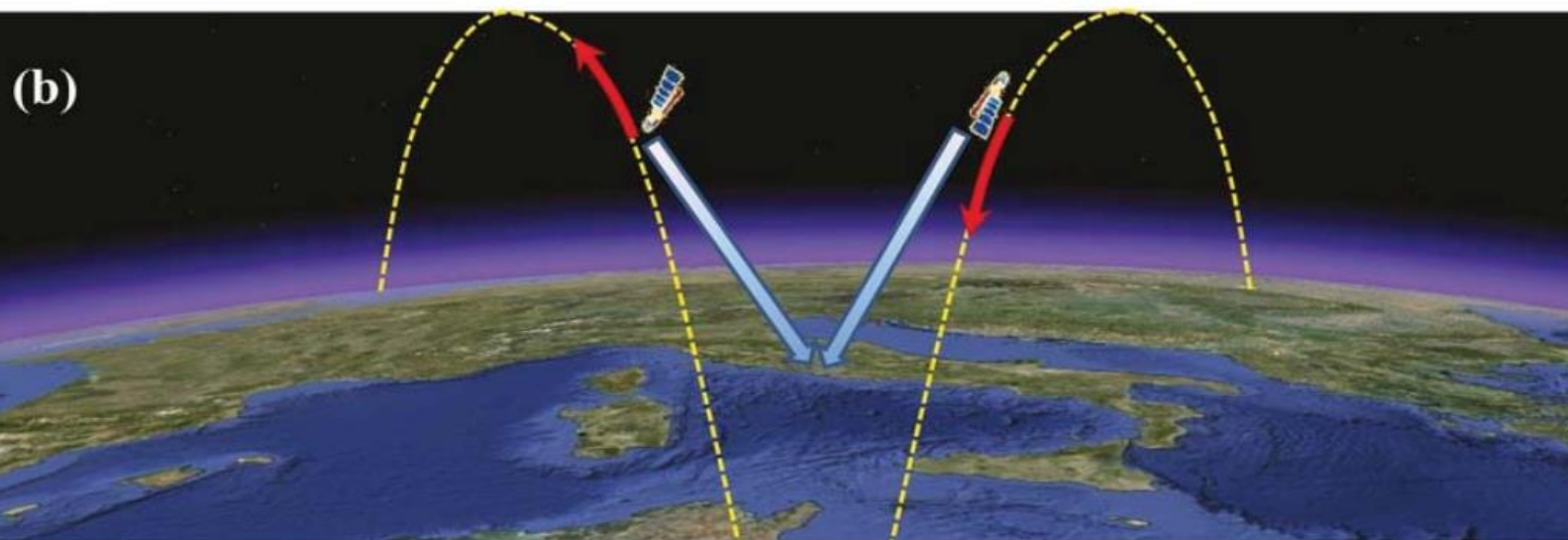
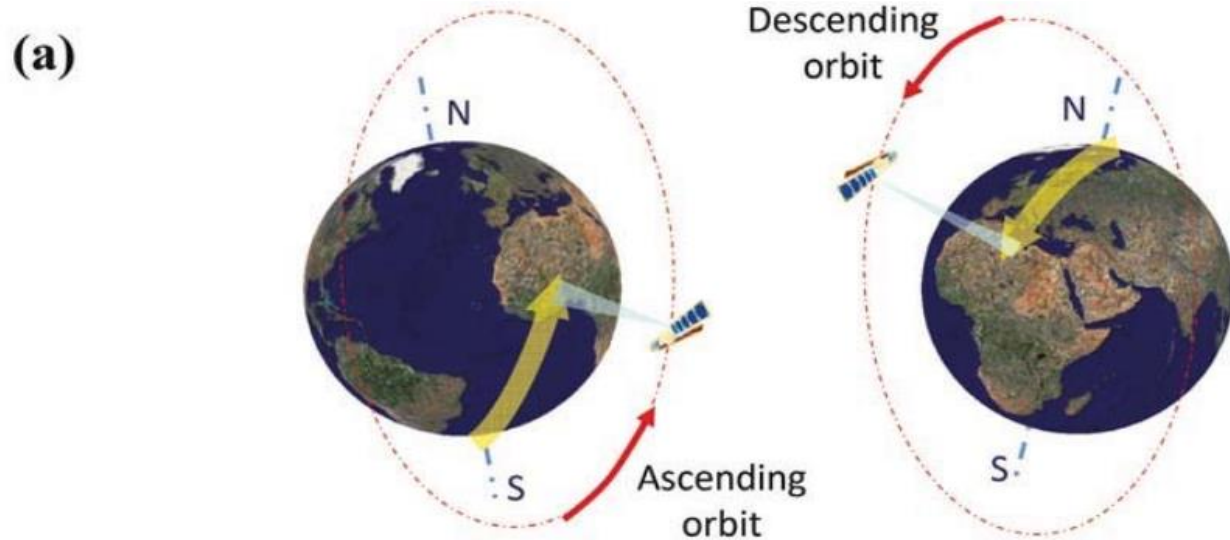
Снимки спутника ЕКА Sentinel-1А:

- С-диапазон, 5.6 см;
- интервал съёмки 12 дней;
- область покрытия снимков составляет до 200x250 км.

Геометрия спутниковой радарной съёмки

В отличие от пассивных приборов дистанционного зондирования, SAR является радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой и обеспечивает активное дистанционное зондирование поверхности Земли. Съёмка ведется наклонным лучом, как правило направо от направления полета. Измеряются смещения отражающего объекта в направлении на спутник.

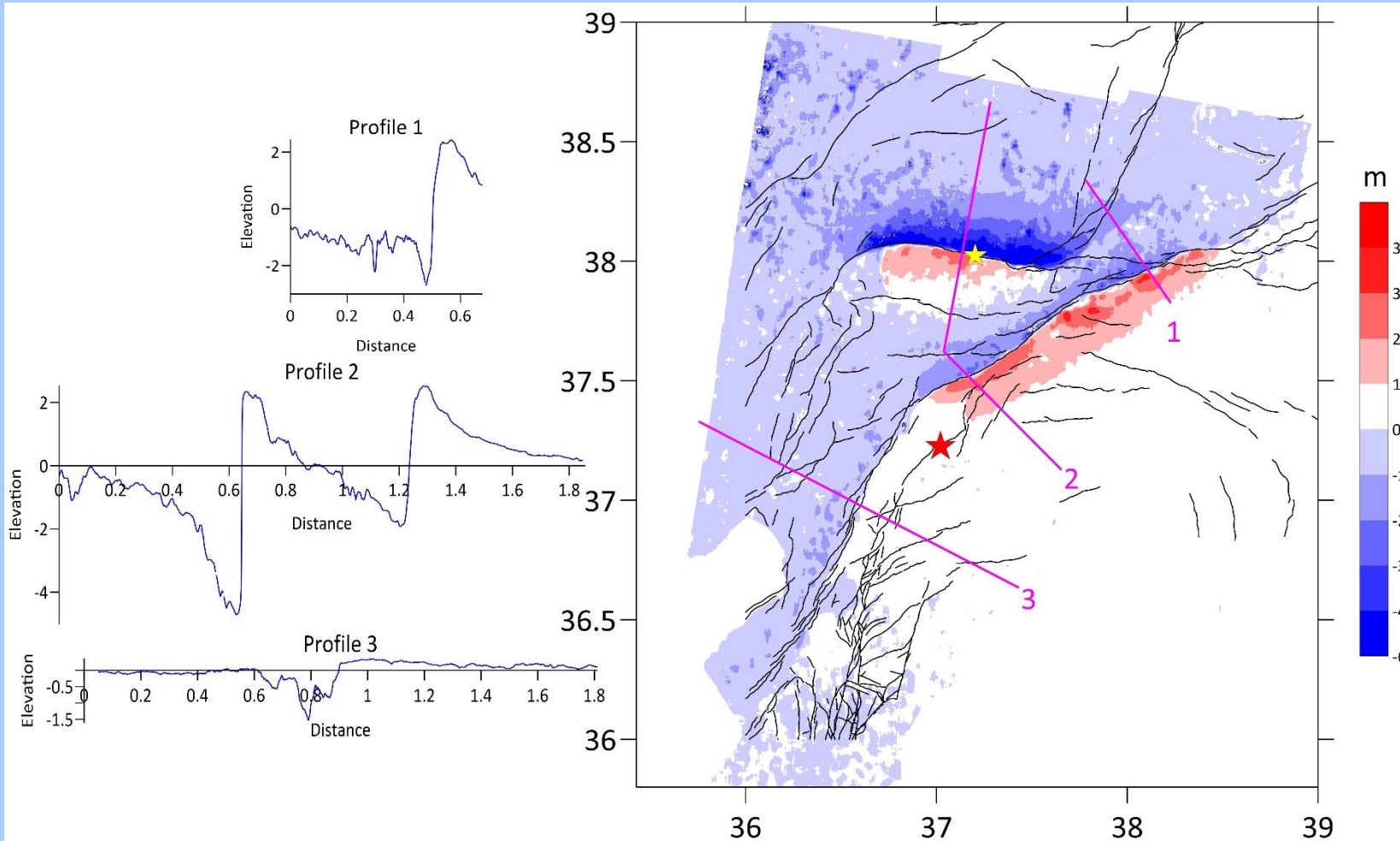
Каждый спутник снимает одну и ту же территорию два раза: когда он пролетает над ней с юга на север (восходящая орбита) и с севера на юг (нисходящая орбита)



Фазовая интерферограмма
в радарных координатах

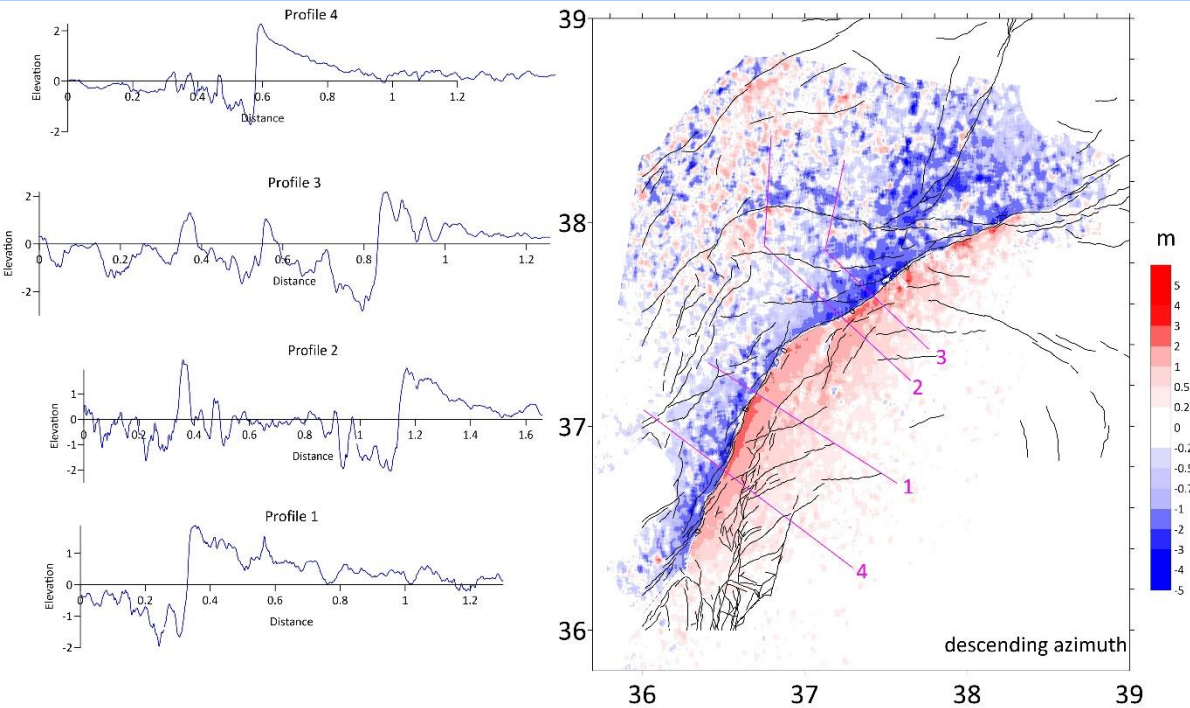
Метод офсетов

Поле смещений земной поверхности (метры) в направлении перпендикулярном орбите спутника (примерно запад – восток)

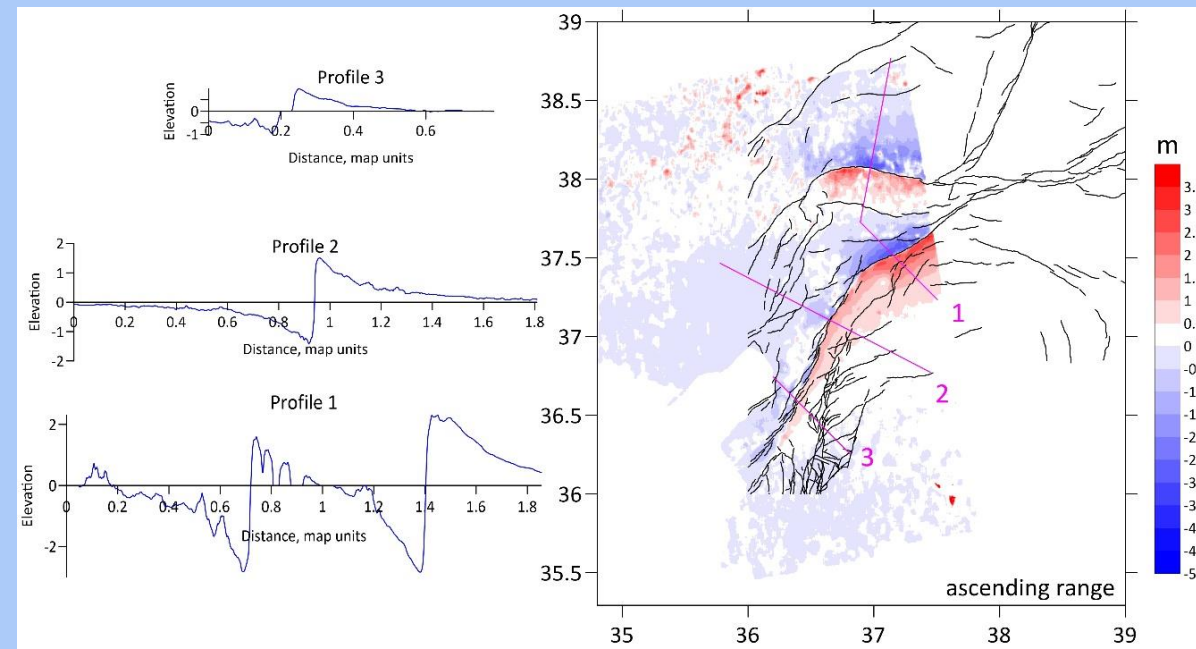
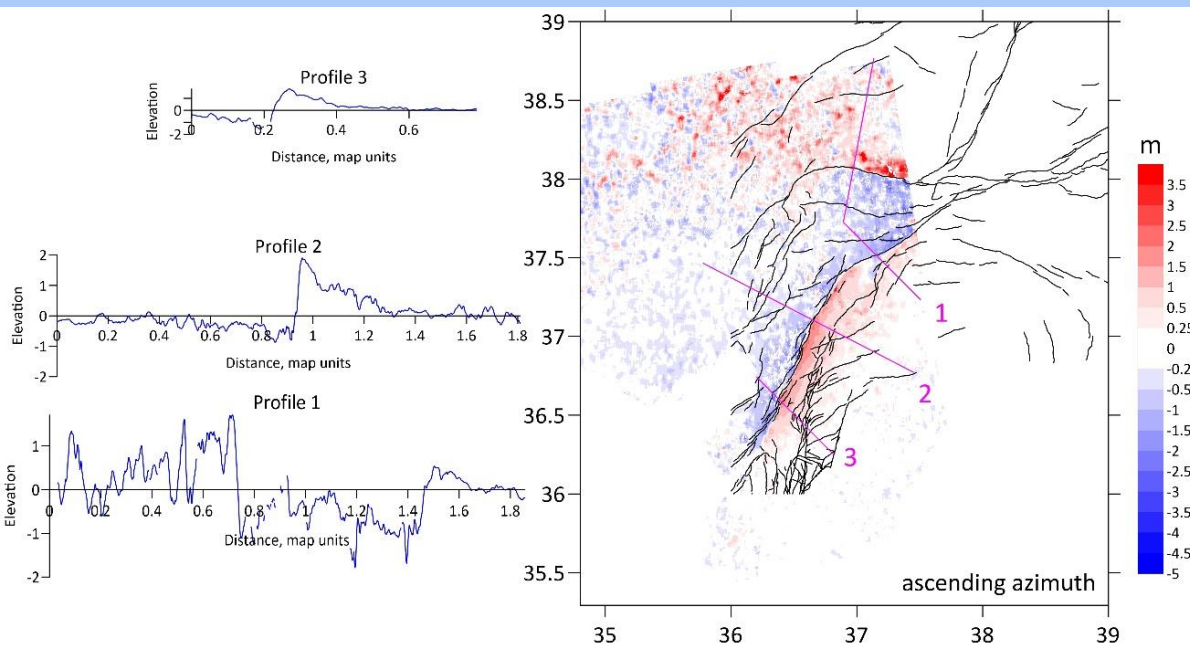


По спутниковым данным с нисходящей орбиты относительные смещения бортов ВАЗР, к которой было приурочено первое событие с магнитудой Mw 7.8 (красная звезда на рис. слева), превосходили 6 м. Поверхность разрыва простирается от области землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 Mw6.7 на севере до побережья Средиземного моря на юге, где 20.02.2023 произошло землетрясение магнитудой 6.3. Второе событие с магнитудой 7.5 (желтая звезда на рис. слева) приурочено к разлому Сюргу-Чардак, относительные смещения бортов которого, согласно спутниковым данным, превосходили 6 м.

Нисходящая орбита, смещения по дальности

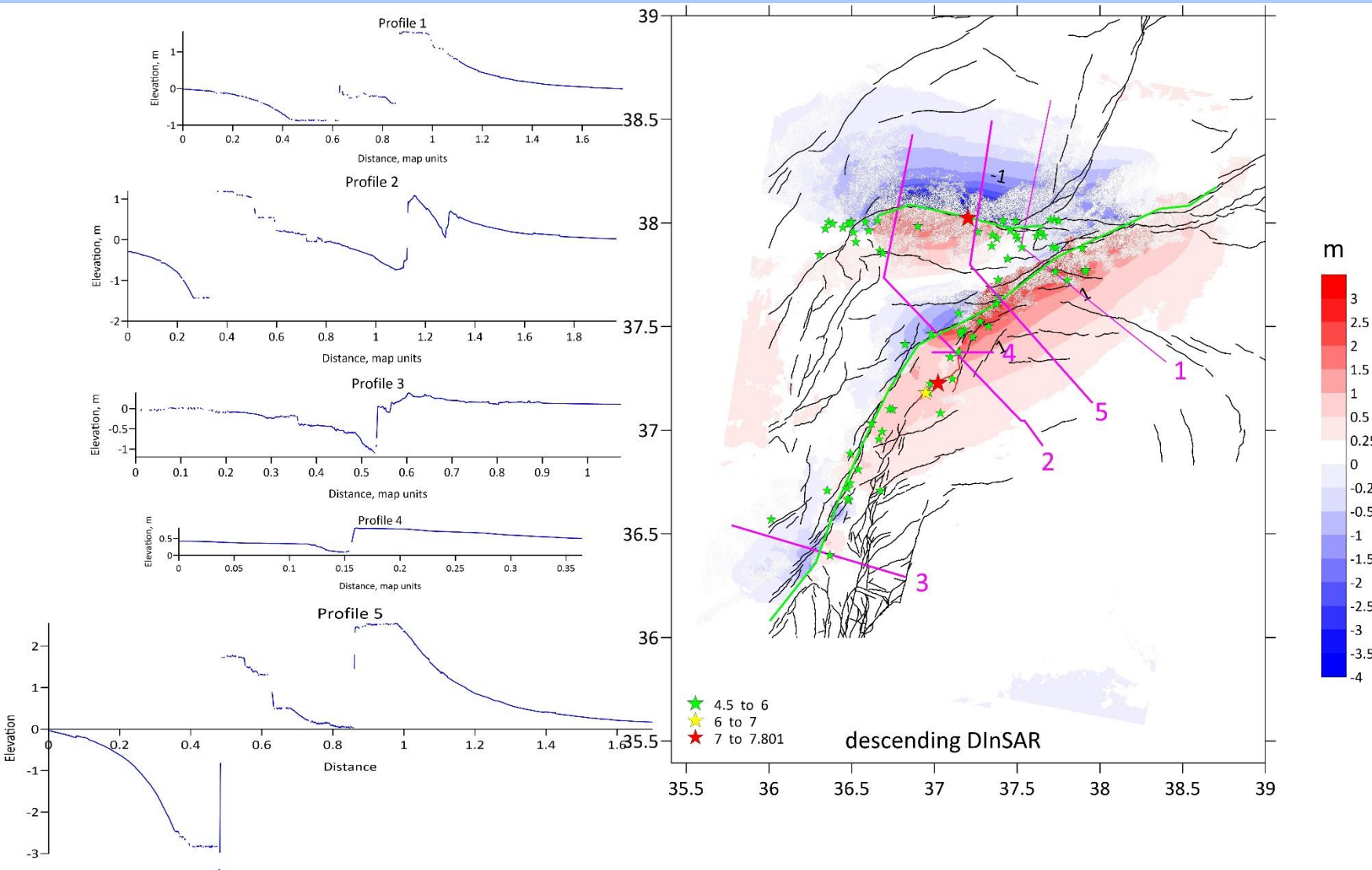


Также можно определить смещения перпендикулярно орбите с восходящей орбиты (внизу справа) и смещения вдоль орбиты (примерно север-юг) с нисходящей (слева сверху) и восходящей (слева внизу) орбит .



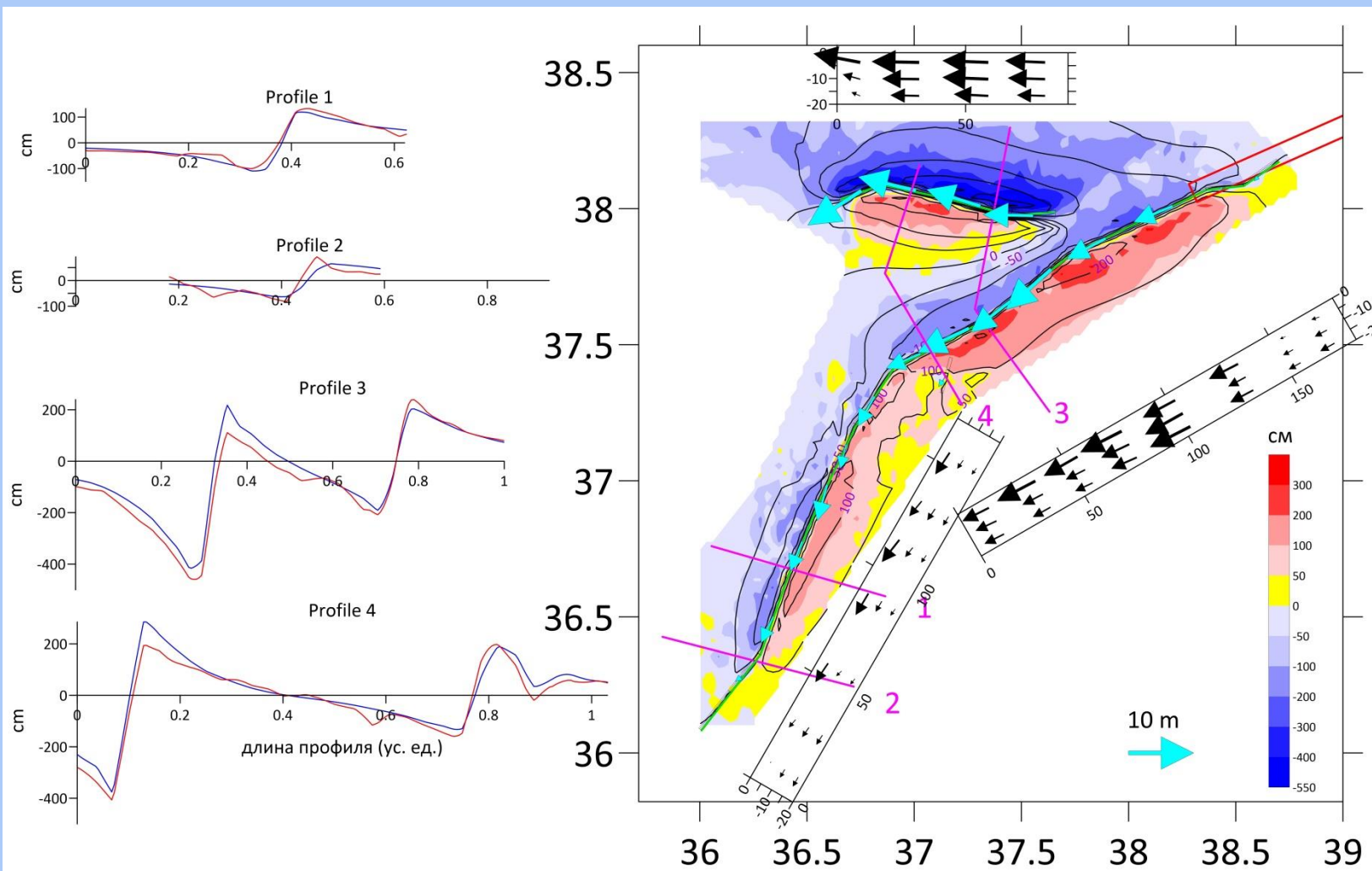
Дифференциальная интерферометрия (DInSAR)

Поле смещений земной поверхности (метры) в направлении на спутник



Метод DInSAR основан на анализе двух радарных снимков. Смещения в направлении на спутник определяются по разности фаз отраженных сигналов при съемке первого и второго снимка. Эти смещения равны сумме вертикальной, северной и восточной компонент смещений, умноженных на синусы и косинусы углов наклона зондирующего луча и азимута орбиты. Смещения определены в 843 млн. точек.

Модель поверхности сейсмического разрыва землетрясений 06.02.2023, построенная по данным РСА интерферометрии.

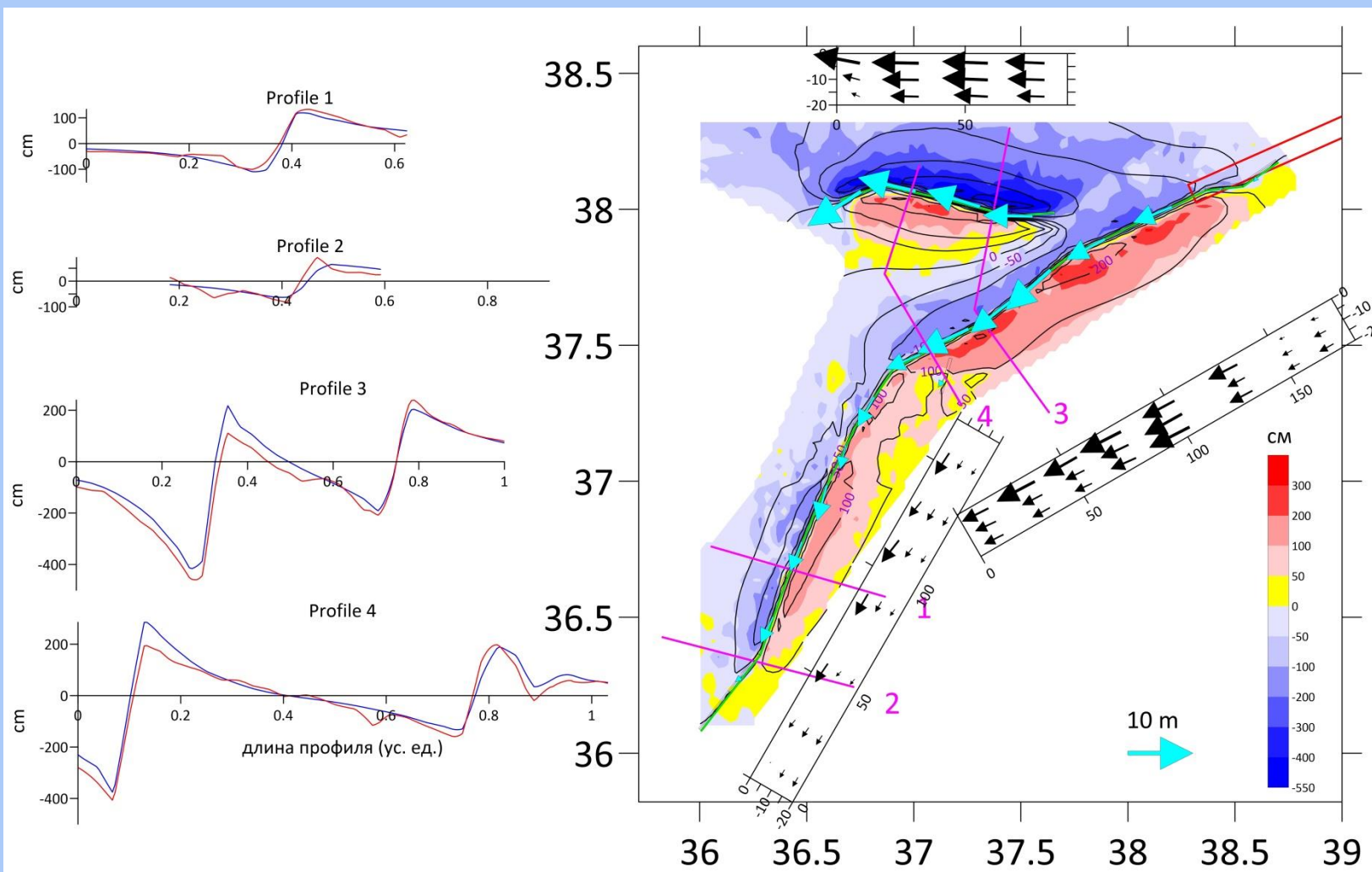


Цветовая карта – смещения земной поверхности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии – рассчитанные по модели смещения земной поверхности. Черные прямоугольники показывают поверхность разрыва в вертикальном разрезе, со смещениями на верхнем, среднем и нижнем уровне. Максимальная длина стрелки 10.2 м в средней части северного отрезка ВАР. Бордовые линии – профили через область разрыва. Слева для этих профилей показаны РСА данные (красный цвет) и подбор по модели (синий цвет).

Для решения использована модель смещений на поверхности сферически расслоенной планеты в результате сдвига по падению и простиранию на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке (Pollitz, 1996).

Стрелки указывают направления смещений на висячем крыле разлома. Для ВАР падение было задано на север под углом 85° .

На южном сегменте ВАЗР смещения монотонно увеличиваются с юга на север, смещения в верхней части разрыва больше, чем в нижней, кроме самого южного элемента, в нижней части которого смещения составили 2.0 м, а в верхней всего 12 см. Именно здесь уже после периода, покрываемого использованными нами РСА снимками, 20.02.2023 произойдет землетрясение магнитудой 6.3, гипоцентр которого располагался на глубине 11.5 км.

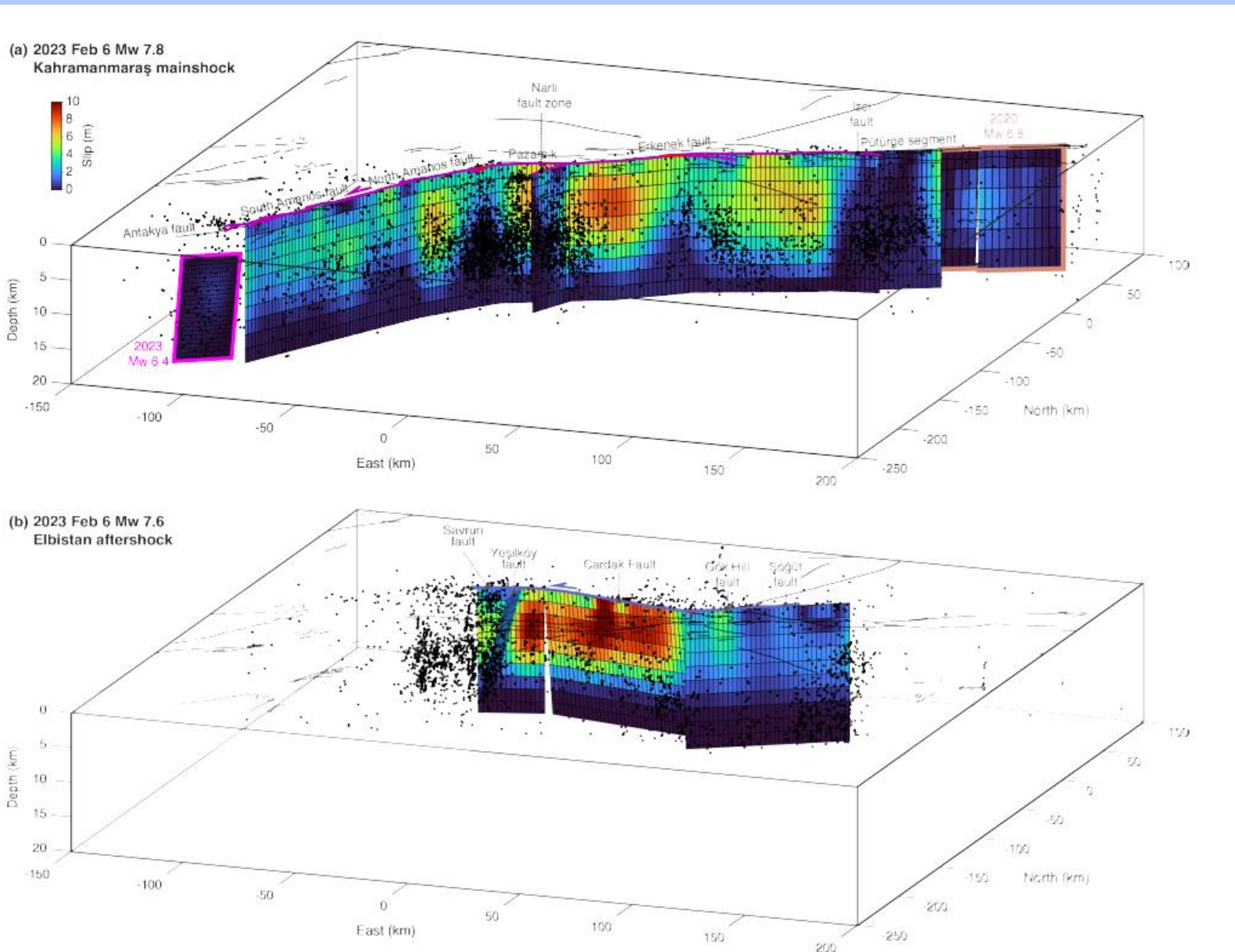


Далее на север амплитуда смещений в верхней части южного сегмента ВАЗР увеличивается до 5.8 м, в средней части – 2.8 м., в нижней части разрыва их максимум не превосходит 1.5 м.

На центральном сегменте ВАЗР, где его простирает поворачивает на З-ЮЗ, амплитуда смещений существенно увеличивается. Смещения в нижней части достигают 10.2 м.

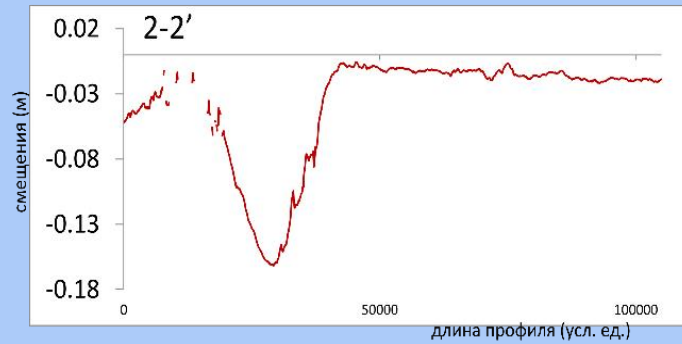
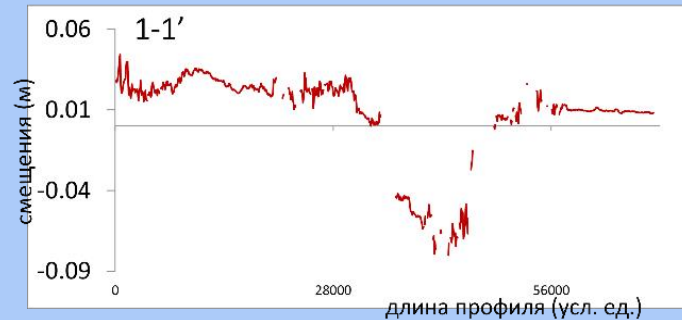
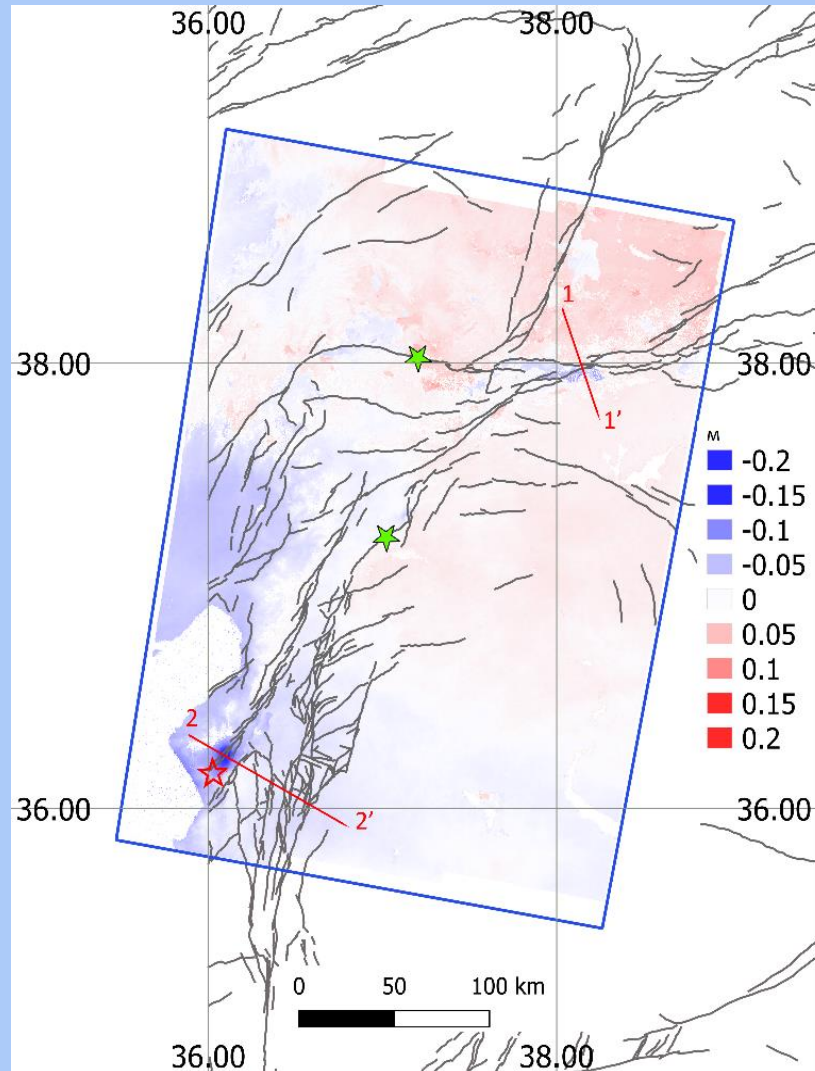
Далее на север смещения убывают, но все же на нижнем уровне самого северного участка они достигают 5 м. Этот участок доходит до поверхности разрыва землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 Mw 6.7, согласно модели этого события, опубликованной на сайте USGS (красный прямоугольник).

Модель поверхности разрыва Varbot et al., 2023



Barbot S., Luo H., Wang T., Hamiel Y., Piatibratova O., Javed M. T., Braitenberg C., Gurbuz, G. (2023). Slip distribution of the February 6, 2023 Mw 7.8 and Mw 7.6, Kahramanmaraş, Turkey earthquake sequence in the East Anatolian Fault Zone // *Seismica*, v2(#3). doi:10.26443/seismica.v2i3.502

Постсейсмические смещения в направлении на спутник за период с 10 по 22 февраля 2023 г.



Амплитуда смещений находится на уровне первых см, кроме очаговой зоны землетрясения 20.02.2023 магнитудой 6.3. На некоторых разломах продолжаются небольшие смещения (профиль 1).

ВЫВОДЫ

1. Данные РСА интерферометрии позволили определить смещения на двух сдвиговых разломах, смещения на которых вызвали землетрясения магнитудой 7.8 и 7.5. Первое событие приурочено к Восточно-Анатолийской зоне разломов, относительные смещения бортов которого превосходили 6 м. Поверхность разрыва перекрывает южное окончание очаговой области землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 с Mw 6.7 на севере до побережья Средиземного моря, где 20.02.2023 произошло землетрясение с Mw 6.3. Относительные смещения бортов на разломе Сюргу-Чардак превосходили 7 м.

2. При модели поверхности сейсмического разрыва использована модель сферически расслоенной планеты. F. Pollitz (1996) показал, что игнорирование сферической расслоенности приводит к ошибкам до 20%. Наибольшие ошибки возникают при наличии большой сдвиговой компоненты. Также ошибку вносит и игнорирование сферичности, при использовании решения в рамках идеализации упругого однородного полупространства, как это сделано в USGS при построении моделей сейсмического разрыва для землетрясений в Турции 2023 г.

3. Отличием нашей модели является детальный учет геометрии разрывов. Для этого разрывы были аппроксимированы 19 плоскостями по простиранию, поделенными на три уровня по падению. Согласно построенной нами модели сдвиговые смещения на центральном сегменте разлома достигают 10.2 м. На южном сегменте ВЗР смещения существенно меньше. Следует подчеркнуть, что смещения зарегистрированы нами за период 29 января и 10 февраля 2023 г, т.е. включают еще и постсейсмические смещения за 4 дня после основных сейсмических событий.

4. На постсейсмическом этапе зарегистрированы смещения в районе землетрясения магнитудой 6.3 и небольшие смещения на восточном продолжении разлома Сюргу-Чардак.