Постсейсмические процессы в области землетрясений 06.02.2023 в Турции по данным спутниковой радарной интерферометрии

Богославская А.В. (1,2), Волкова М.С. (1), Михайлов В.О. (1)

(1) Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия
(2) МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, Москва, Россия

Землетрясения 6 февраля 2023 г.

ПЕРВОЕ СОБЫТИЕ

Mw 7.8

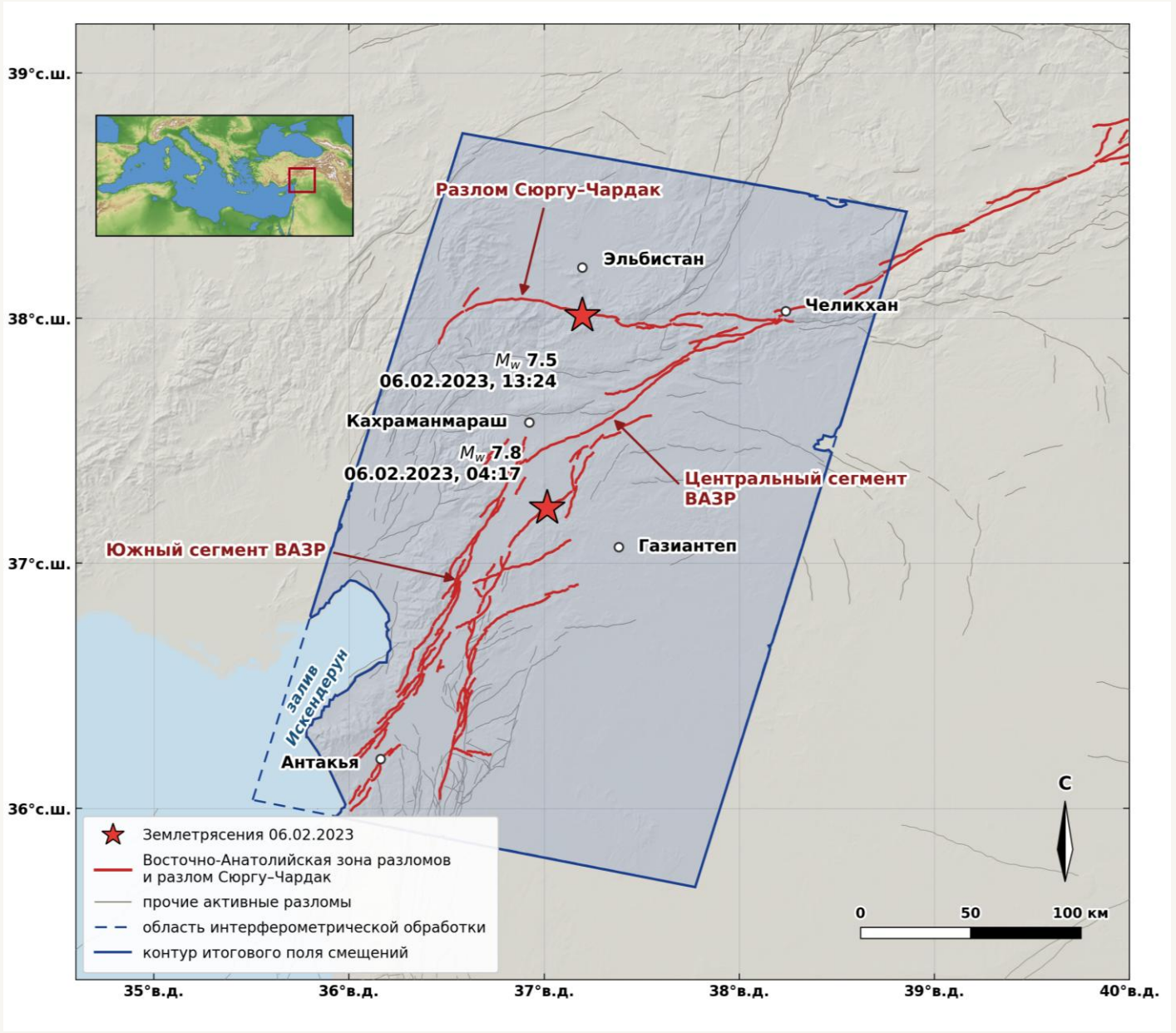
Южный и центральный сегменты ВАЗР; сдвиговые смещения на центральном сегменте превосходили 10 м

ЧЕРЕЗ 9 ЧАСОВ

Mw 7.5

Разлом Сюргу–Чардак, отходящий от ВАЗР в районе г. Челикхан

Оба землетрясения представляют собой **левосторонние сдвиги**; два разрыва разной ориентации усложняют структуру поля смещений



Ожидаемые постсейсмические процессы

Крип

Асейсмическое скольжение на продолжении поверхности разрыва

Локализован у разломов

Вязкоупругая релаксация

Релаксация напряжений в астеносфере; скорость определяется её вязкостью

Длинноволновая, гладкая

Пороупругость

Перераспределение поровых флюидов в верхней части коры

Аномалии у очагов

Процессы различаются пространственным масштабом и связью с разломами

Что уже известно

Михайлов и др., 2023а; 2023б	Модель поверхности разрыва по Sentinel-1A — служит основой для расчёта вязкоупругой релаксации
Guo et al., 2025	Модель крипа за первые ~4 мес.; его момент составил около 11 % косейсмического
Liu et al., 2026	Три компоненты почти за два года; горизонтальные смещения определяются асимметричной вязкоупругой релаксацией

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Постсейсмические смещения за весь 2023 г. вдоль протяжённой зоны активных разломов

01
Контроль точности атмосферных поправок

02
Моделирование вязкоупругой релаксации

03
Удаление длинноволнового тренда

04
Сопоставление с данными ГНСС

Исходные данные

SENTINEL-1A

25 пар

нисходящая орбита, ближайшие по времени снимки, 10.02.2023 – 31.12.2023

Рельеф

ЦМР SRTM 3 версии 4, разрешение 3″

Атмосфера

Карты зенитной тропосферной задержки сервиса GACOS

Контроль

Временные ряды координат пунктов ГНСС: 5 станций в кадре

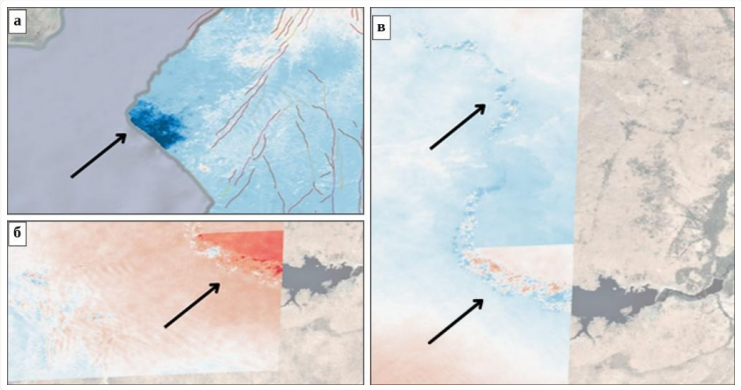
- ENVI SARscape и QGIS
- активные разломы по базе ГИН РАН, землетрясения по каталогу USGS
- ГНСС с сайта Невадской геодезической лаборатории

1 **Объединение двух соседних сцен** вдоль направления пролёта спутника

2 **Генерация интерферограммы**, топографическая фаза считается по ЦМР и вычитается

3 **Адаптивный фильтр Гольдштейна** и выбор порога когерентности

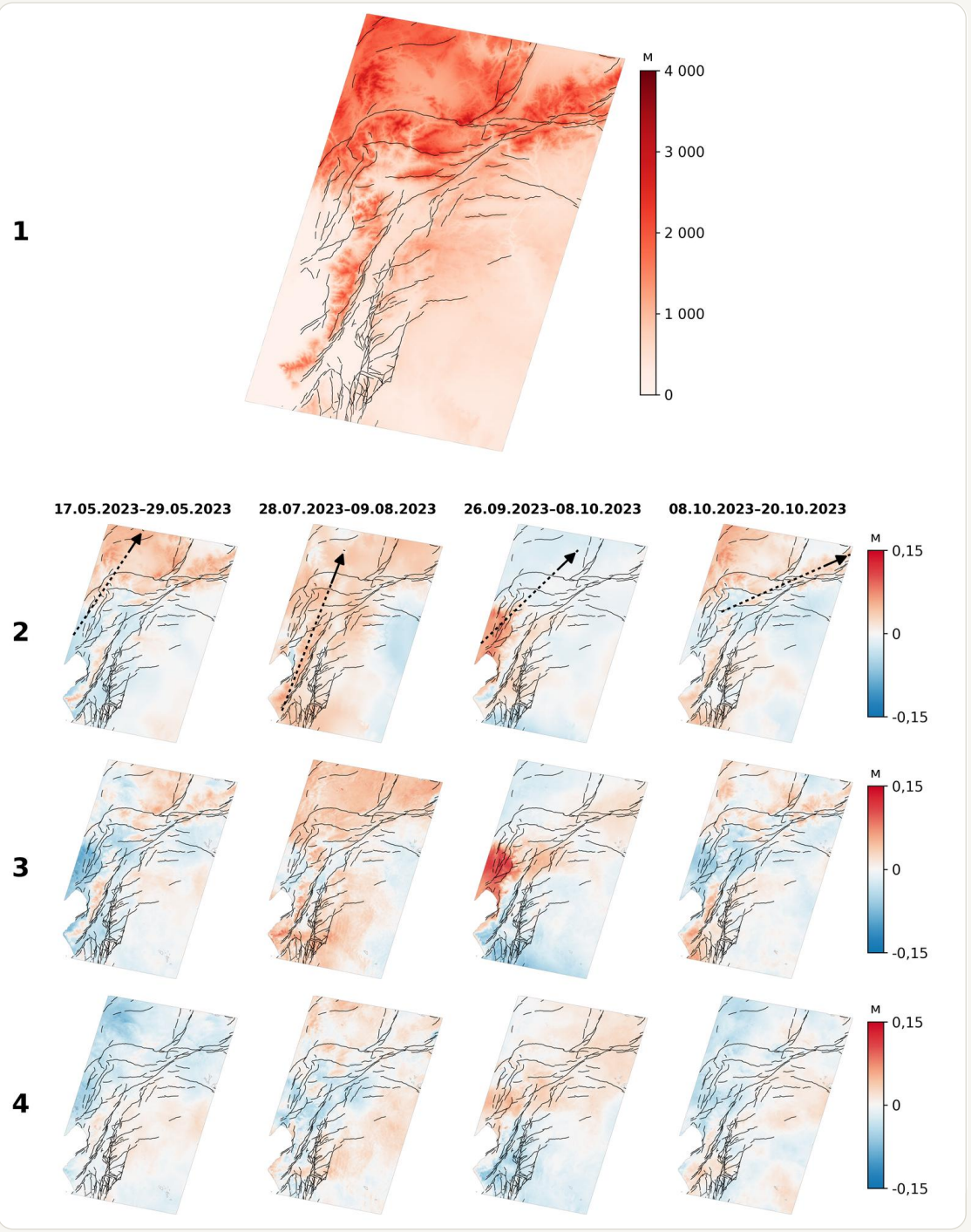
4 **Развёртка фазы** — размер блоков (прямоугольных окон) развёртки, перекрытие



5 **Уточнение и повторное выравнивание** по контрольным точкам вне зон смещений

6 **Пересчёт фазы в смещения LOS** и геокодирование

7 **Атмосферная коррекция GACOS**



Атмосферная коррекция GACOS

Интерферометрическая фаза = смещение + шум + ошибки модели рельефа + неточность орбиты + **атмосфера**

ПОПРАВКА

Разность задержек на даты двух снимков пары, общая референсная точка и проецирование в LOS

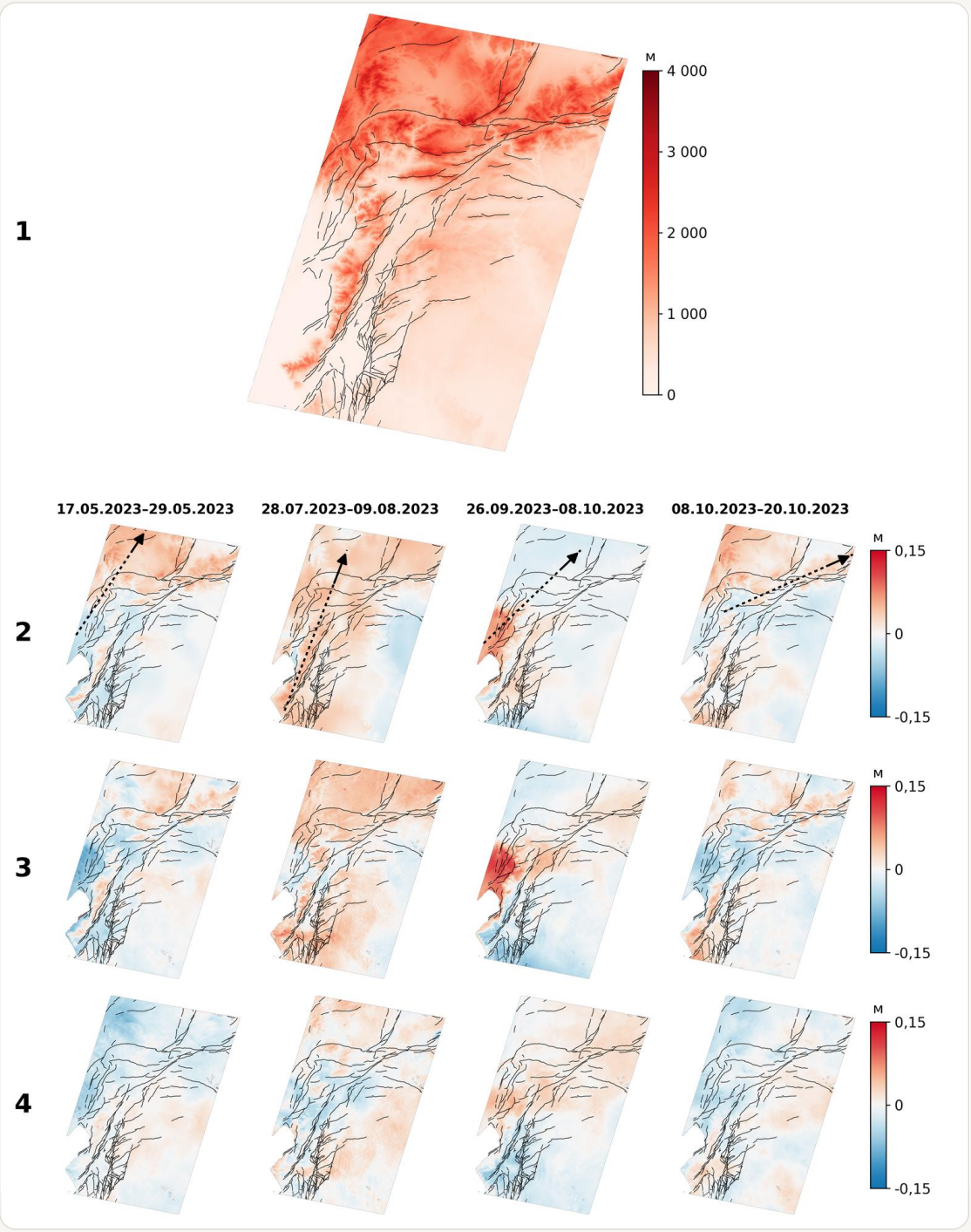
СХОДСТВО ПОПРАВКИ С РЕЛЬЕФОМ

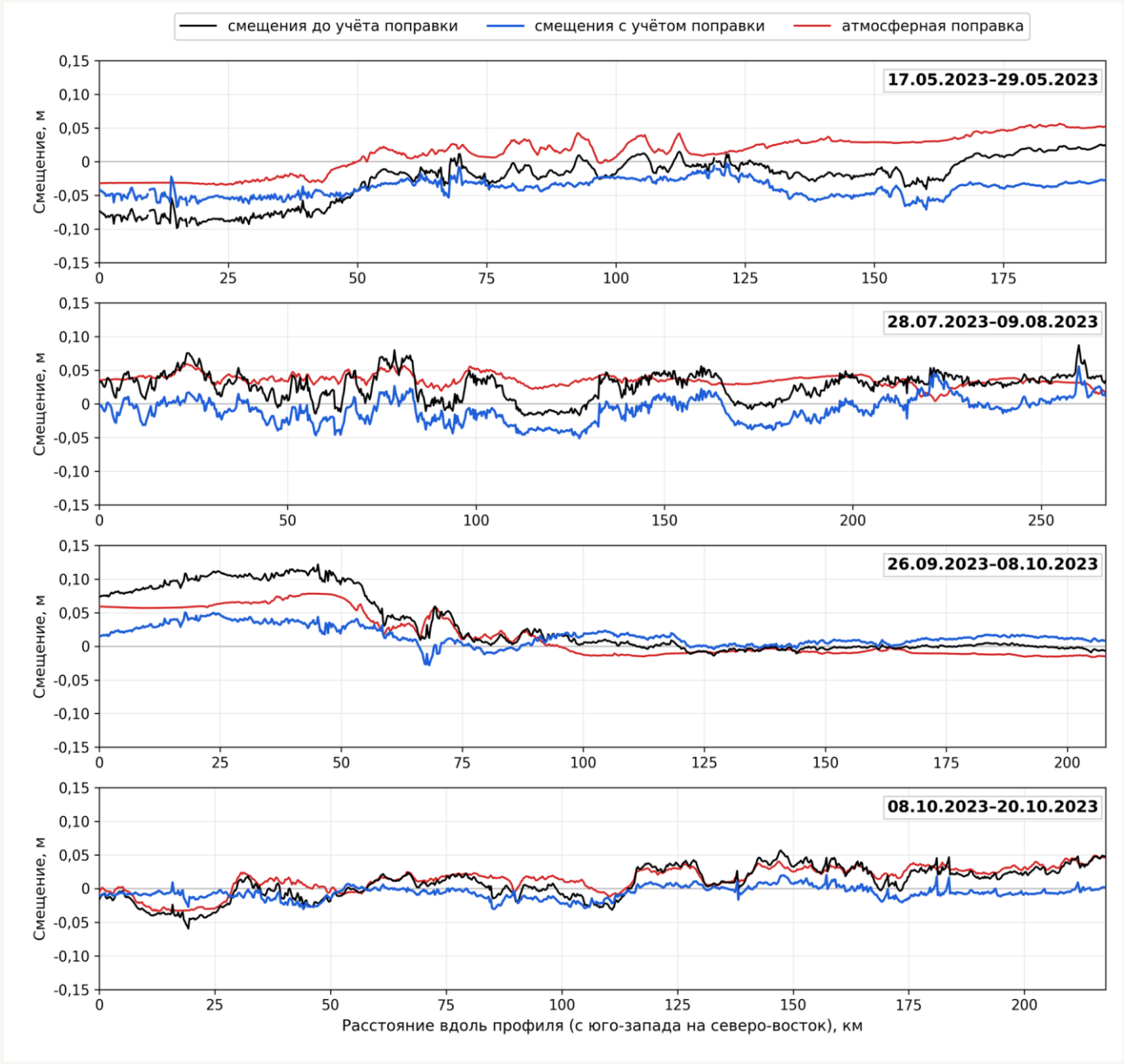
GACOS устраняет стратифицированную компоненту; турбулентная почти не коррелирует между снимками с интервалом 12 сут и частично осредняется при суммировании за длительные промежутки времени

LOS величина поправки — до 0.08 м

Четыре периода 2023 г.
Сверху вниз: рельеф · поправки GACOS · смещения до коррекции · смещения с учётом поправки

Анализ коррекций по профилям





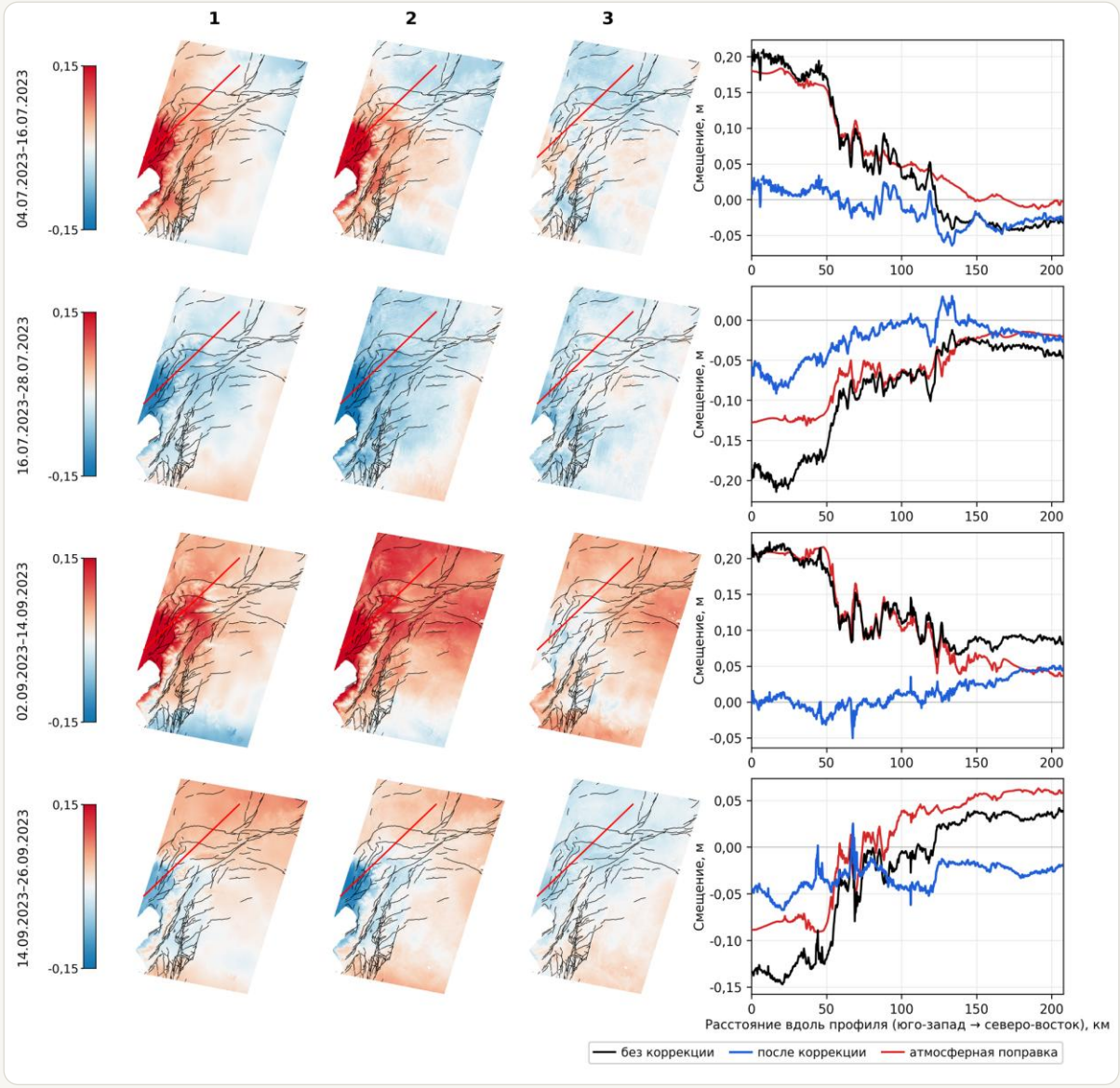
Оценка эффективности коррекции

Критерии: снижение корреляции смещений с рельефом, относительное изменение дисперсии поля

Параметр	17.05–29.05	28.07–09.08	26.09–08.10	08.10–20.10
Корреляция с рельефом до	0.53	0.47	−0.08	0.43
Корреляция с рельефом после	−0.43	0.14	0.29	−0.26
Дисперсия до, 10^{-4} м²	4.44	4.29	7.93	3.69
Дисперсия после, 10^{-4} м²	2.78	3.02	3.38	2.33
Изменение дисперсии, %	−37	−30	−57	−37

При **относительном увеличении дисперсии более чем на 5–10 %** коррекция признавалась неудачной, и пара использовалась без поправки

Зона залива Искендерун



20 см

атмосферная составляющая

6 см

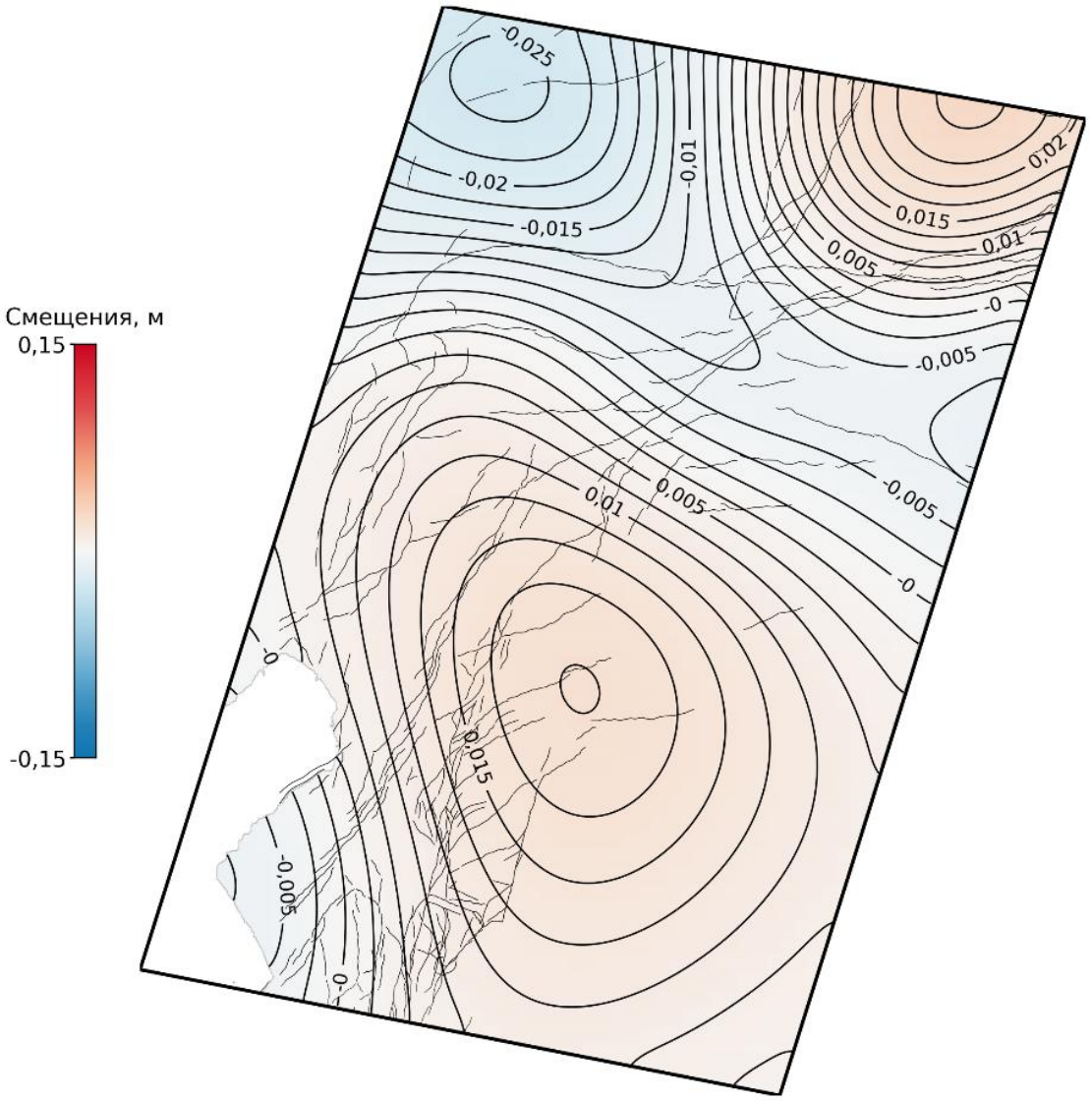
остаток после удаления поправки по GACOS

На порядок больше ожидаемых постсейсмических смещений, составляющих первые сантиметры

Результаты для района требуют осторожной интерпретации. Здесь же станция ГНСС ONIY

Низменность, зажатая между горными хребтами и морем: повышенная влажность и температурные градиенты дают сложную структуру задержек

Моделирование вязкоупругой релаксации



Смещения LOS за 10.02 – 31.12.2023, обусловленные вязкоупругой релаксацией, м

МОДЕЛЬ

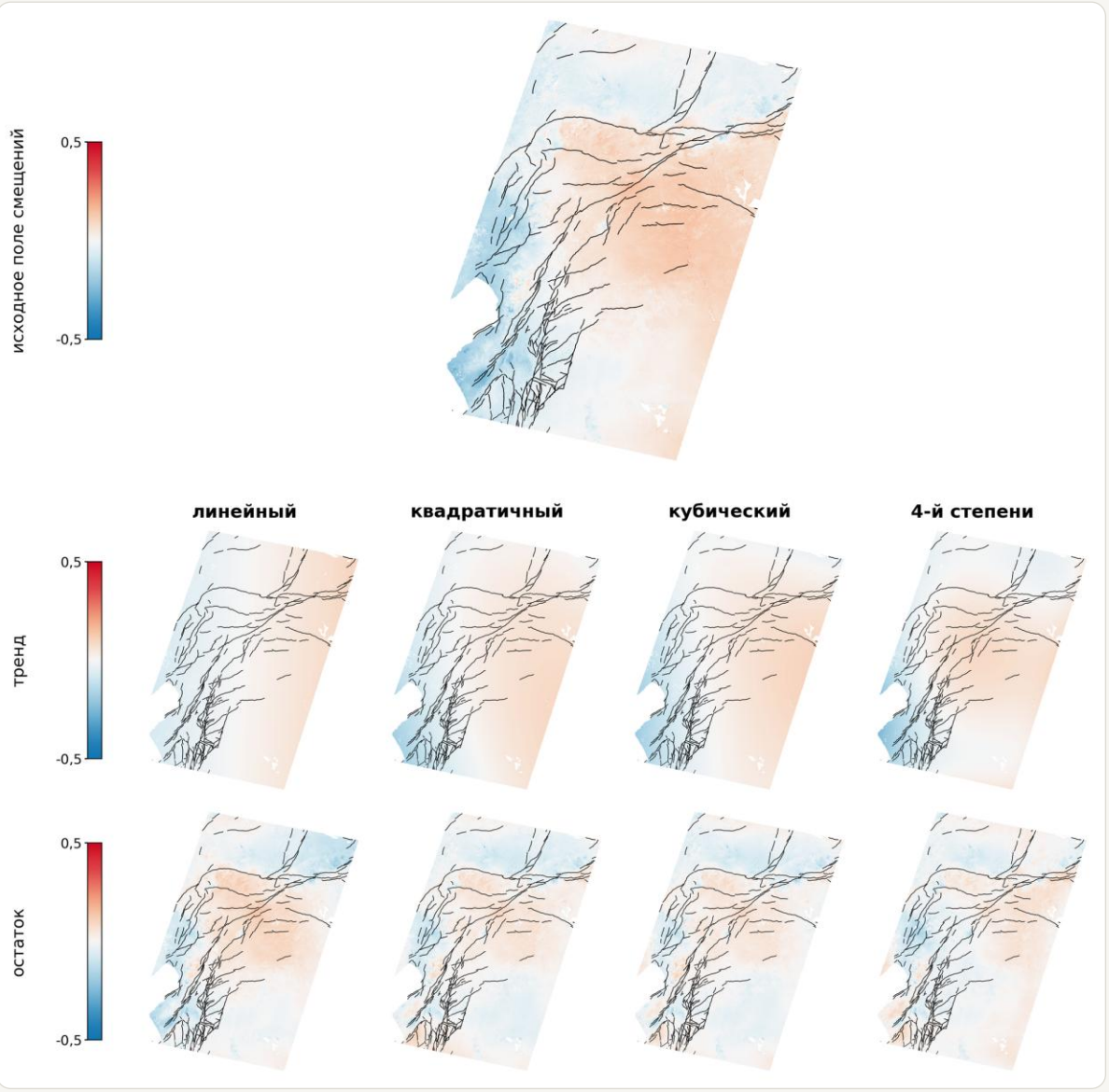
Сферически-симметричная Земля, реология тела Бюргерса, мощность упругого слоя 62 км. Источник — модель поверхностей разрыва обоих событий, построенная в ИФЗ РАН

±2.6 см
за 10.6 месяца

Размер сцены
несколько крупных лепестков

Поле **гладкое** и не содержит особенностей, относящихся к разломным линиям: изолинии пересекают разломы, не испытывая изломов

Удаление длинноволновой компоненты



ПОРЯДОК ОПЕРАЦИЙ

релаксация вычитается до оценки тренда и возвращается после его удаления

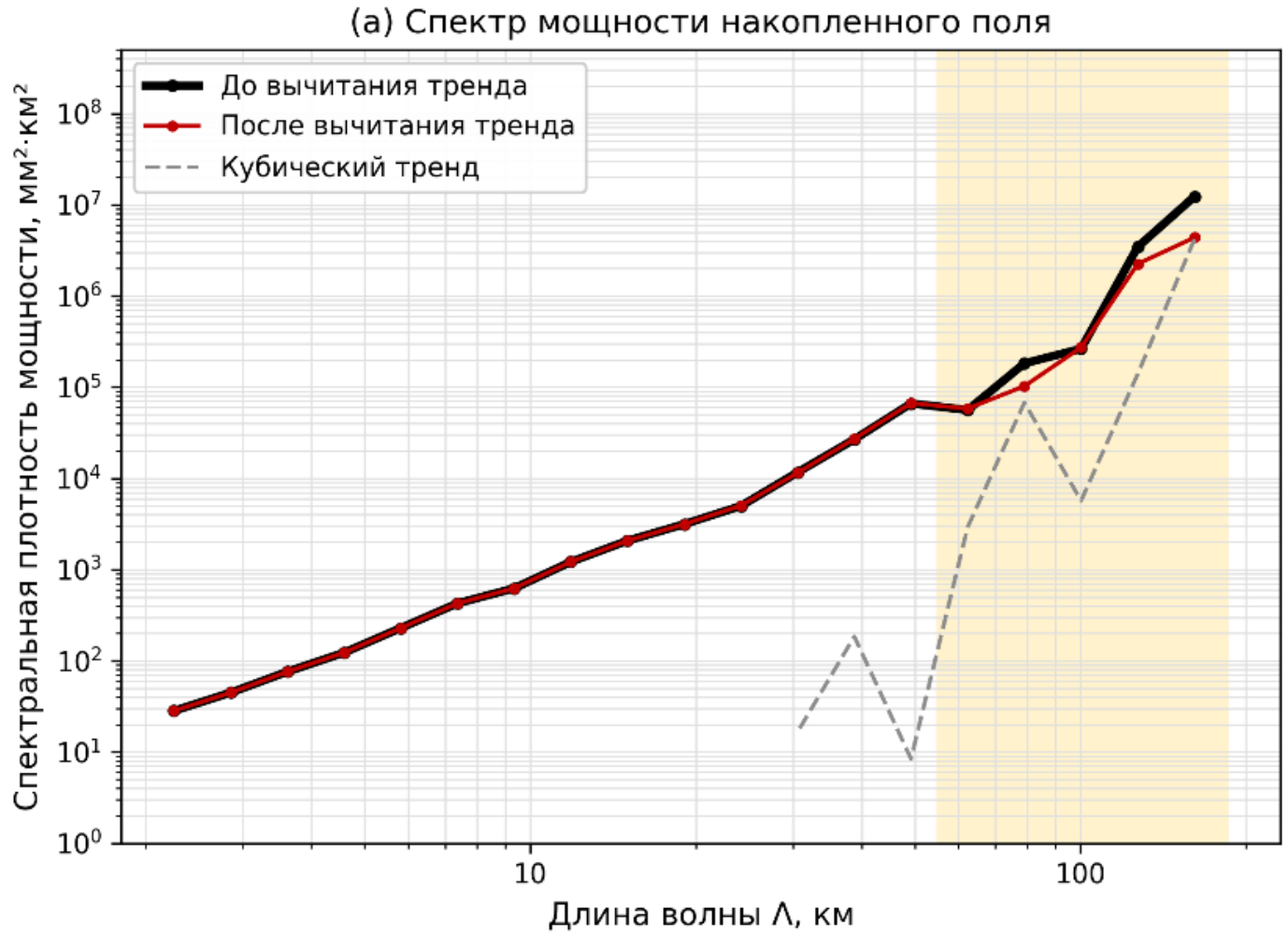
Иначе часть релаксации была бы удалена дважды

Модель тренда	R^2	$\Delta\sigma/\sigma$, %
Линейная	0.46	—
Квадратичная	0.68	−22
Кубическая	0.73	−8
4-й степени	0.73	−0.1

Выбран **кубический полином** — минимальная степень, при дальнейшем повышении которой аппроксимация улучшается незначительно

Вверху — накопленное поле после вычитания релаксации · в середине — поверхности тренда · внизу — остатки

Спектр мощности: какие масштабы затрагивает удаление тренда





При **Λ < 50 км** спектры совпадают с точностью лучше 1 %, спектр трендовой поверхности там на два и более порядка ниже — **приразломные постсейсмические смещения сохраняются**

Данные ГНСС и их приведение к LOS

В отличие от интерферометрии, ГНСС измеряет смещение пункта в глобальной системе отсчёта и содержит вековое фоновое движение

01 · Вычитание фона

Линейная скорость, годовая и полугодовая сезонность по досейсмическому интервалу

02 · Логарифмический тренд

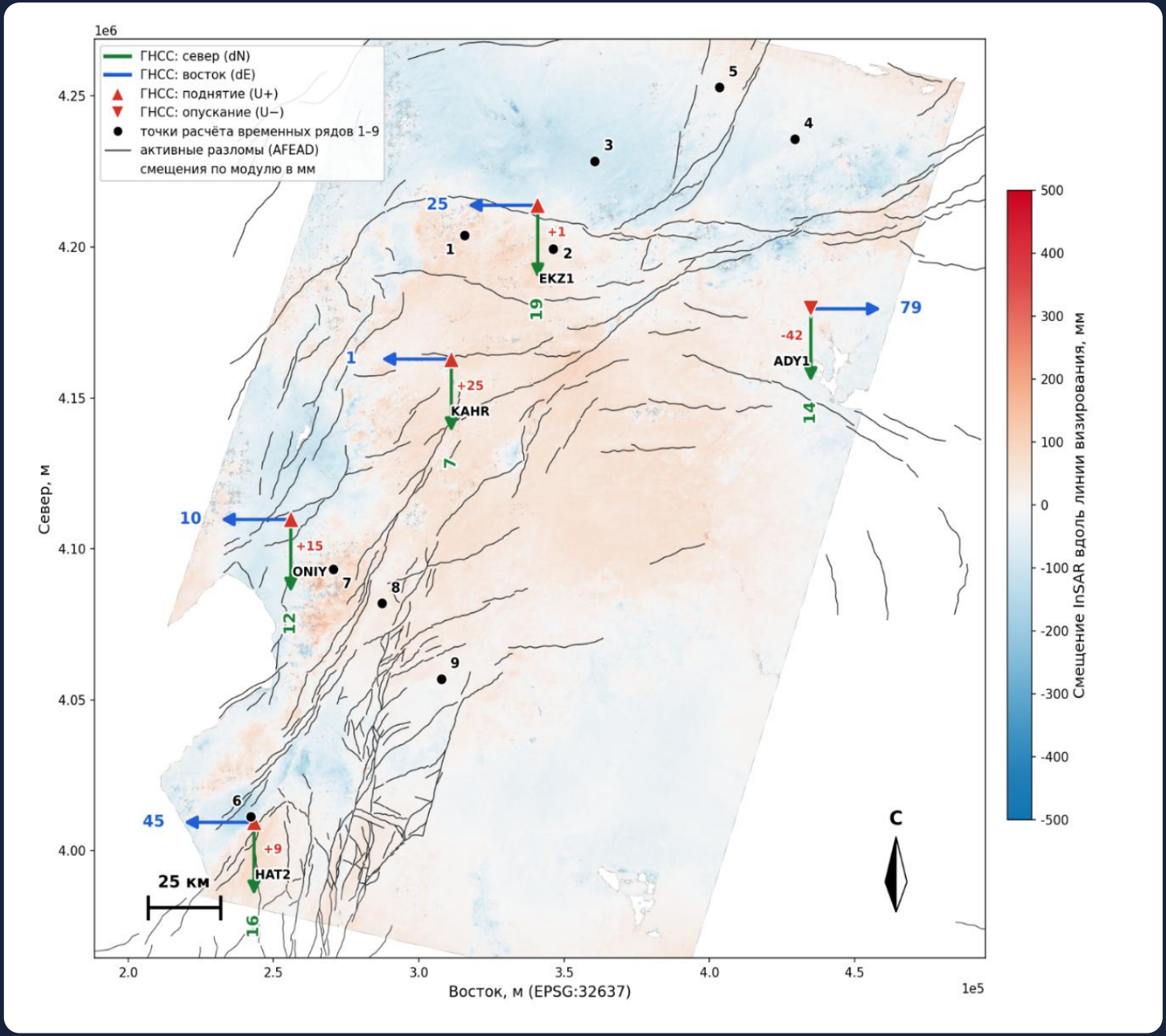
Подбирается к каждой компоненте по отдельности: характерные времена релаксации различаются

03 · Пересчёт в LOS

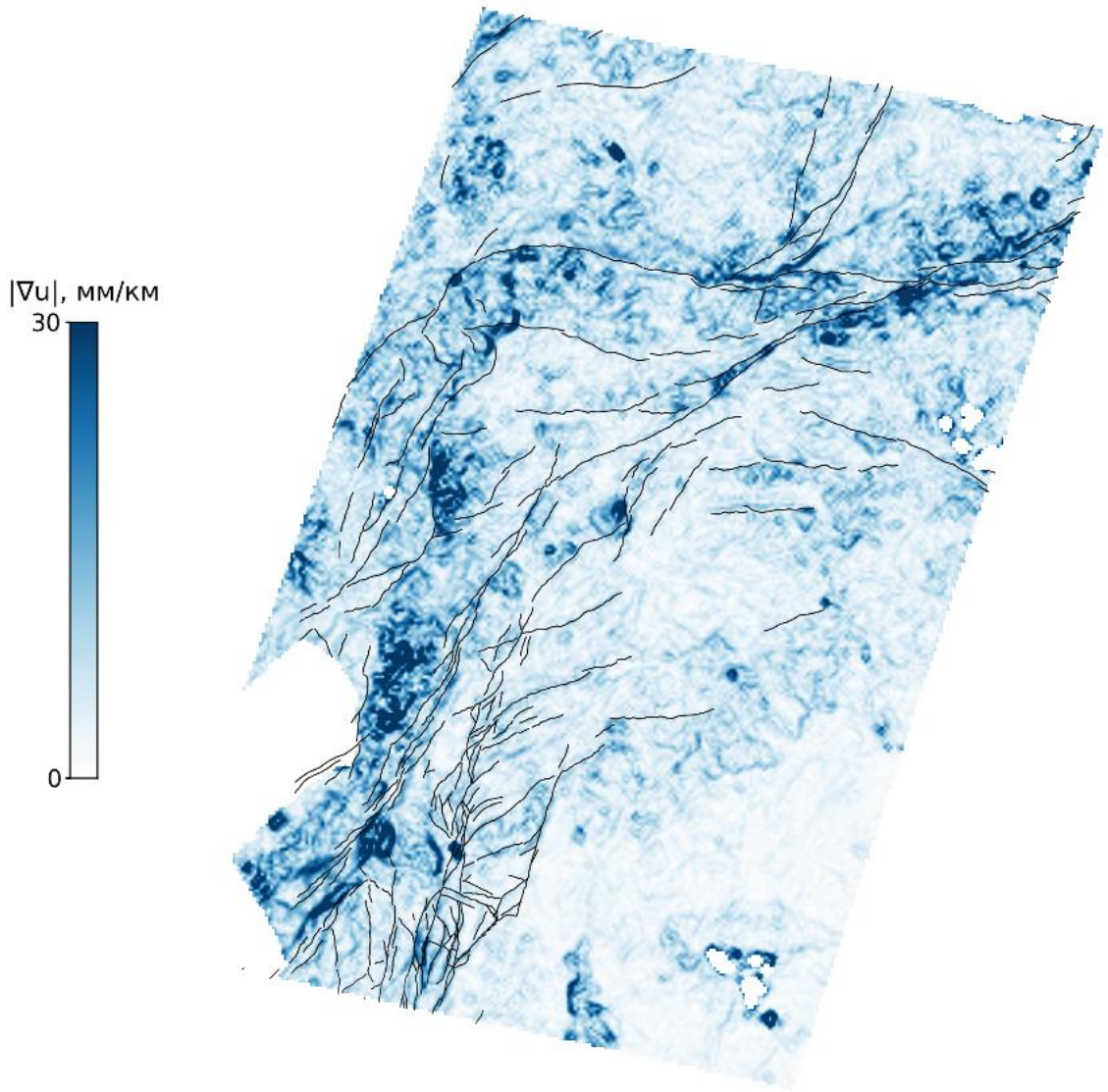
Вертикальная компонента сохраняется — она входит в проекцию с наибольшим весом

Пять станций в пределах поля: ADY1, EKZ1, HAT2, KAHR, ONIY · ряды в глобальной системе IGS20 — станции на разных плитах

Итоговое поле постсейсмических смещений за 2023 год



Градиент остаточного поля



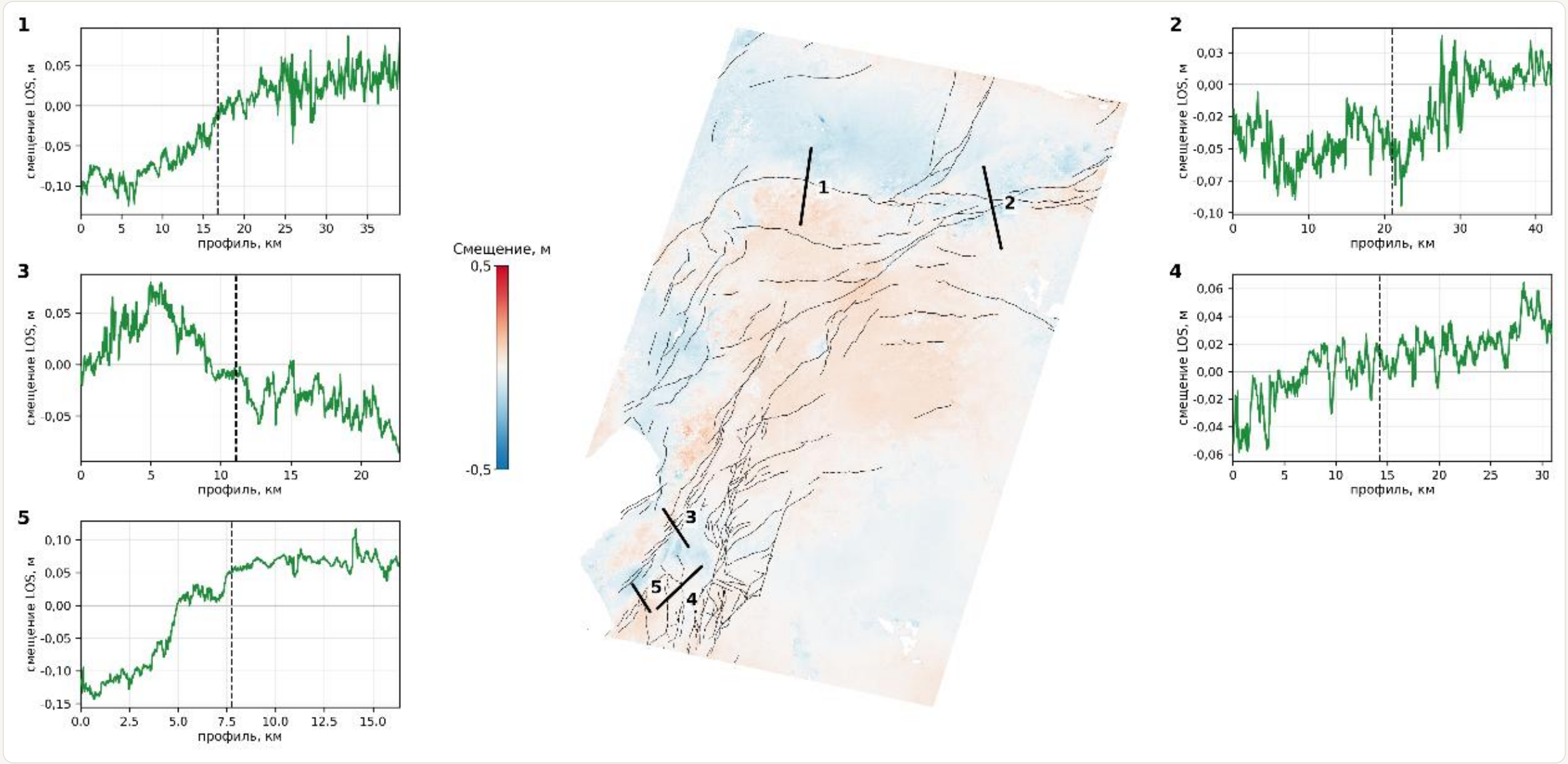
После вычитания поля вязкоупругой релаксации и кубического тренда для остаточного поля вычислены частные производные и модуль градиента

Наиболее высокие значения градиента находятся вблизи разломов

Поле вязкоупругой релаксации гладкое и не содержит особенностей, относящихся к разломным линиям, — приразломную локализацию оно объяснить не может

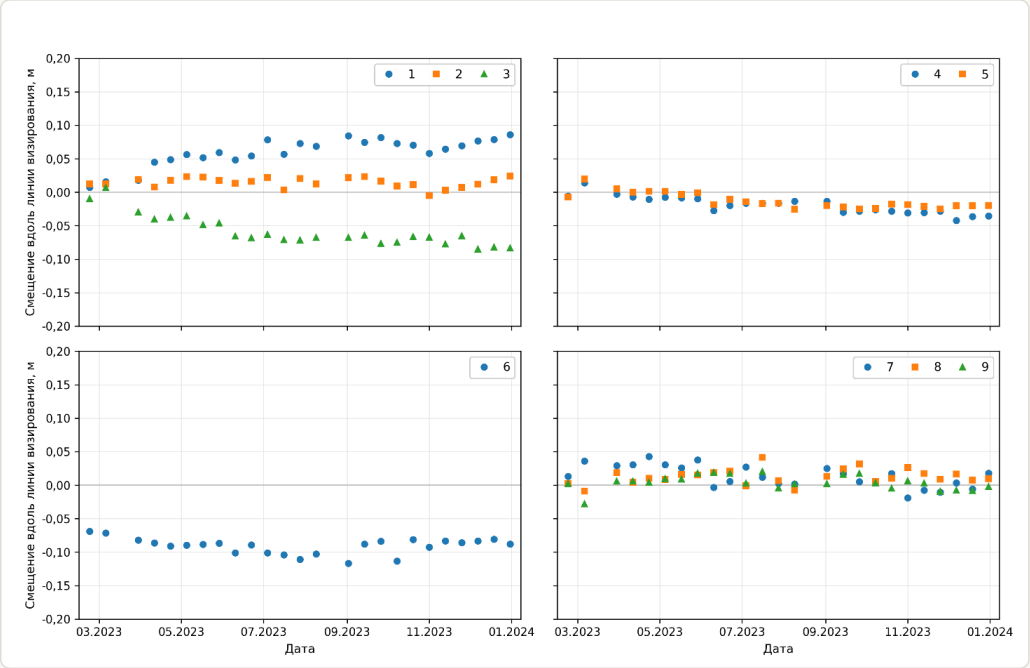
Модуль градиента поля остаточных смещений после вычитания кубического тренда, мм/км

Профили поперёк разломных сегментов

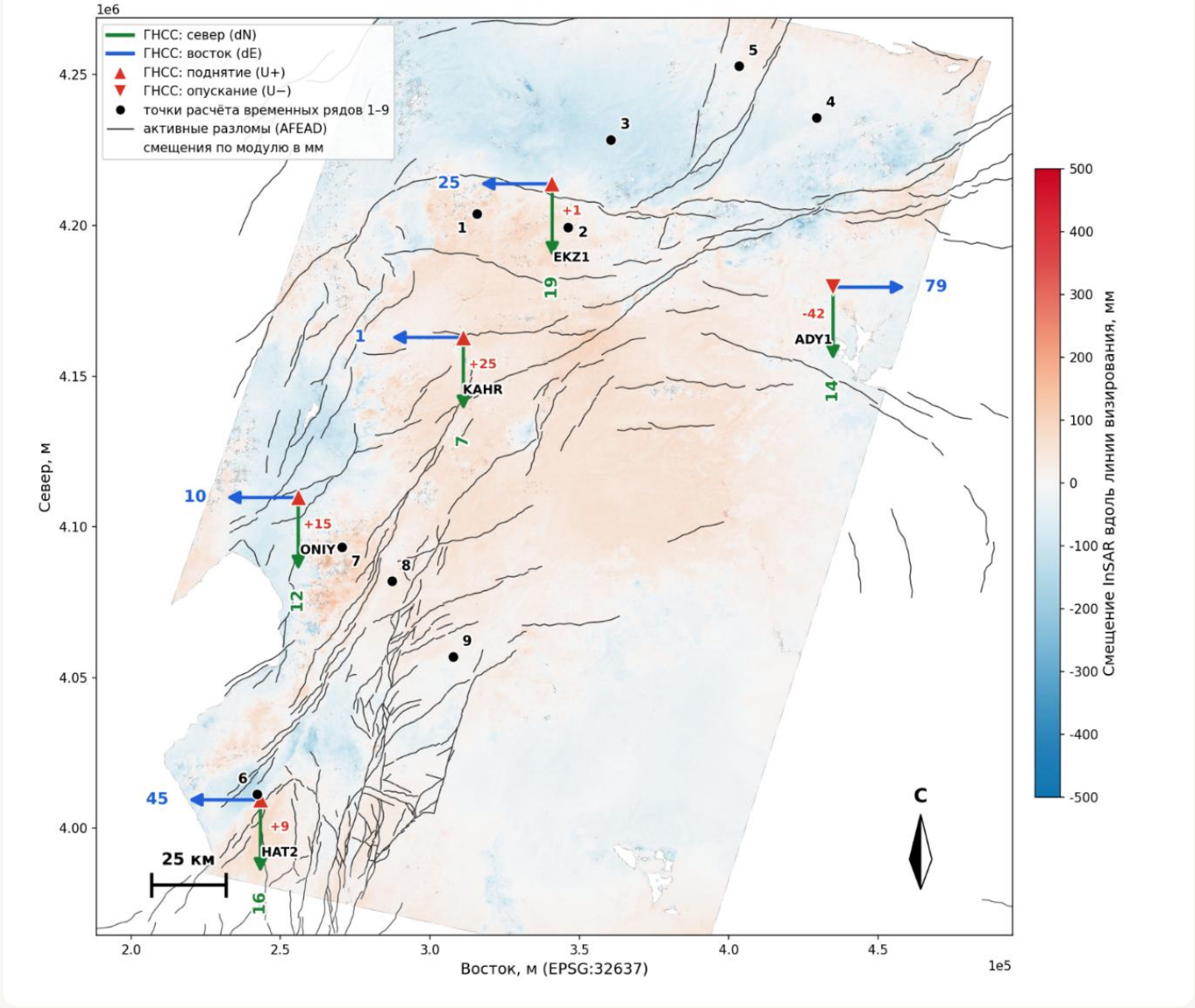


Видны области, в которых смещения **испытывают скачок при переходе через разлом** и меняют знак; перепад достигает **7–20 см** · вертикальная пунктирная линия — точка пересечения профиля с разломом

Временные ряды смещений в точках 1–9



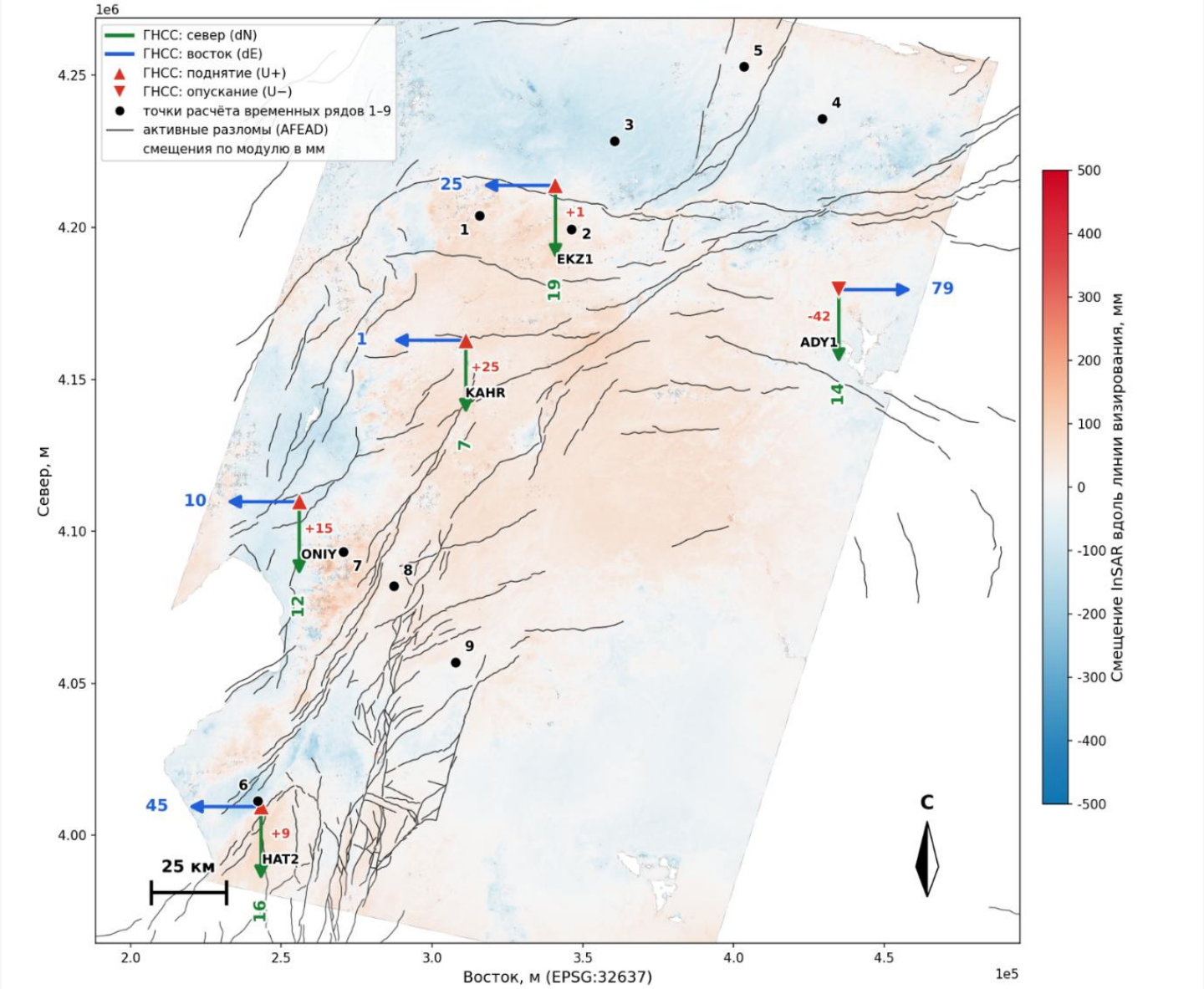
- **1, 2** — южный борт разлома Чардак, положительные смещения, к спутнику
- **3** — северный борт, устойчивое накопление отрицательных смещений весь год
- **4, 5** — стабильны, разлом почти параллелен орбите
- **6** — зона Искендеруна, менее надёжна



Сопоставление с данными ГНСС

Станция	ГНСС, мм	InSAR, мм	Модуль разности,мм
HAT2	−21	−16	5
EKZ1	−13	−21	8
ADY1	10	21	11
KAHR	19	56	37
ONIY (Искендерун)	6	−47	53
Среднее отклонение без ONIY	—	—	15

На трёх станциях из четырёх расхождение **не превышает 12 мм**. На KAHR оно больше, однако **знак смещения тот же** — смещение почти целиком определяется шумной вертикальной компонентой, а расхождение InSAR и ГНСС сильнее меняется от даты к дате, признак остаточного влияния атмосферы.



Заключение

1. Объединение сцен обеспечило **непрерывность поля вдоль ВАЗР**; выполнялся подбор порога когерентности и параметров развёртки фазы — размера блоков и перекрытия

2. Коррекция GACOS с контролем дисперсии и коэффициента корреляции смещений с рельефом; данные в зоне залива Искендерун признаны менее надёжными

3. Моделирование вязкоупругой релаксации и удаление кубического тренда; спектры показали, что **деформация с $\Lambda < 50$ км не затронута**

4. Сопоставление с пятью станциями ГНСС: **среднее отклонение 15 мм** без учёта станции в прибрежной зоне

5. Области смещений вытянуты вдоль разломов и могут быть связаны с **постсейсмическим крипом**; локальные аномалии у очагов — **пороупругость**; есть стабильные области

Спасибо за внимание!