

Последствия землетрясения 6 февраля 2023 года в Турции по данным радиолокатора Sentinel-1

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

В работе представлены предварительные результаты интерферометрической обработки данных европейского радиолокатора Sentinel-1A, снятых до и после землетрясения 6 февраля 2023 года. Обнаружены площадные смещения земной поверхности. Обсуждаются особенности подвижек вблизи эпицентра землетрясения.

Ключевые слова: радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), радиолокационная интерферометрия, смещение поверхности, землетрясение

Consequences of the earthquake of February 6, 2023 in Turkey according to Sentinel-1 radar data

L.N. Zakharova, A.I. Zakharov

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino branch

The study presents preliminary results of interferometric processing Sentinel-1A radar data with observations dates before and after the earthquake occurred on February 6, 2023. Large area displacements of the earth surface are detected. Peculiarities of motion near the earthquake epicenter are discussed.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), SAR interferometry, surface displacement, earthquake

Введение

Радиолокационная интерферометрия — один из распространённых инструментов анализа последствий смещений земной поверхности, происходящих в результате различных причин — как катастрофических, так и медленнотекущих, — среди которых можно назвать землетрясения [1], оползни [2], ледники [3], опускания почвы на морском побережье [4] или вследствие выемки полезных ископаемых [5] и другие. Будучи источником данных, не зависящих от солнечного освещения, с качеством, мало зависящим от погодных условий в зоне съёмки, спутниковая радиолокация в последние десятилетия заняла место в ряду надёжных источников информации о поверхности нашей планеты.

В настоящее время научное сообщество располагает архивом радиолокационных данных С-диапазона (длина волны 5.6 см), обновляемым практически в режиме реального времени, который позволяет получать данные радиолокатора Sentinel-1A для множества областей земной поверхности. Поэтому после одного из крупнейших в средиземноморском регионе землетрясений, произошедшего 6 февраля 2023 года, за которым последовали тысячи повторных толчков, данные Sentinel оказались весьма востребованы.

Результаты обработки и их интерпретация

Первой интерферометрической парой, охватывающей событие 6 февраля, являются данные с восходящего витка 28 января и 9 февраля (интервал 12 суток). Таким образом,

на интерферограмме в результате обработки этой пары можно ожидать суммарные последствия всех подвижек, которые произошли между названными датами, включая два основных толчка магнитудой 7.8 и 7.5, зарегистрированные 6 февраля. Для охвата всей территории, подверженной смещениям, были выбраны две последовательно снятых сцены размером приблизительно 180×250 км.

Результаты обработки в виде интерферограммы представлены на рис. 1. Один цветовой цикл соответствует смещению в направлении на спутник величиной 28 мм. Видно, что наиболее часто полосы расположены вблизи разлома, идущего от южного берега залива Искендерун (тёмная область в нижнем левом углу рис. 1) на северо-восток. Это означает максимальные сдвиги в этой области. Удаление от этой линии сопровождается уменьшающейся частотой полос и, соответственно, меньшими смещениями на поверхности.

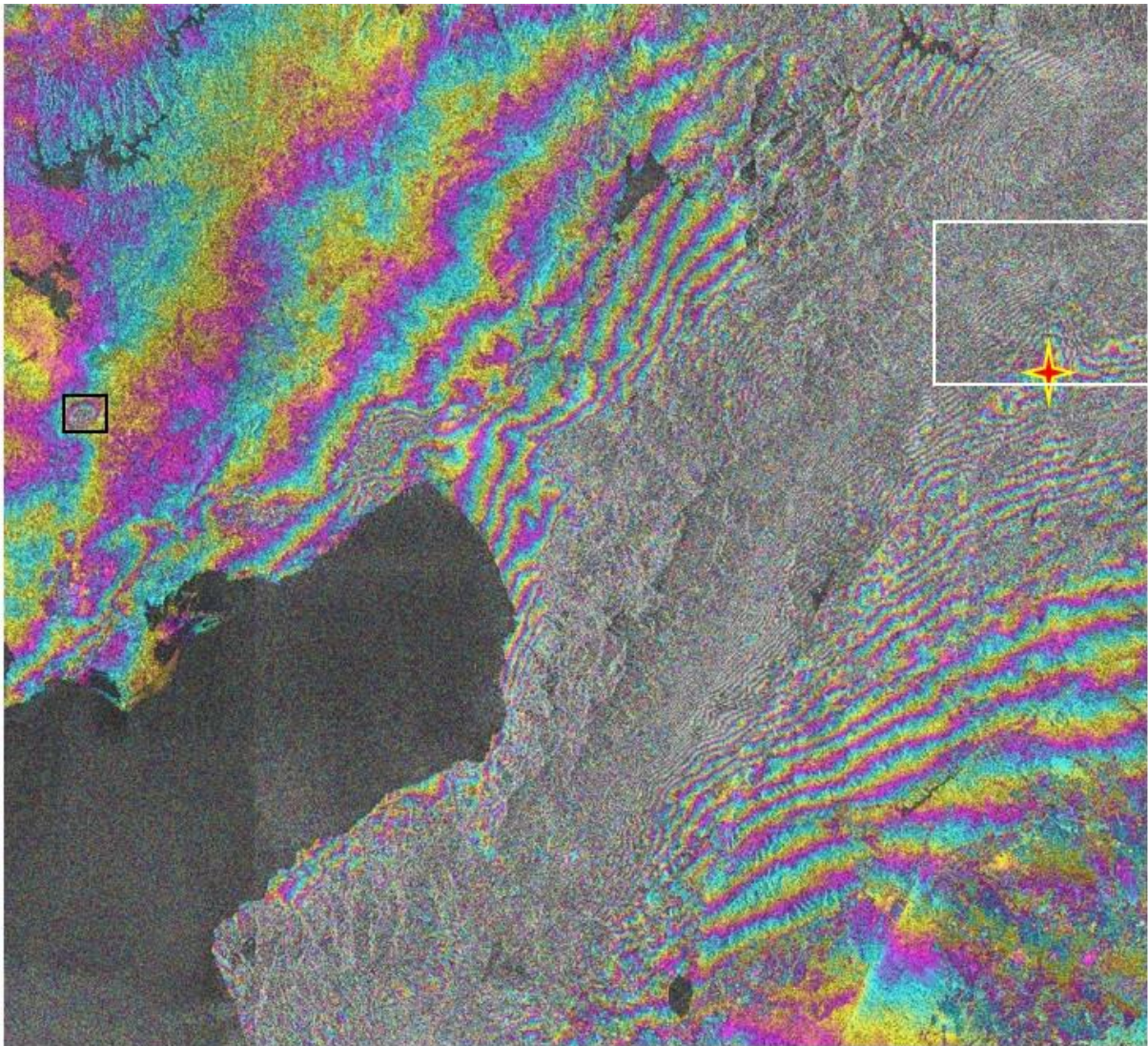


Рис. 1. Общий вид интерферограммы по району землетрясения. Четырёхлучевая звезда отмечает эпицентр первого толчка магнитудой 7.8. Белый прямоугольник соответствует фрагменту на рис. 2. Чёрный прямоугольник соответствует фрагменту на рис. 3

Как видно на рис. 1, полосы имеются повсюду за исключением областей полной декорреляции (где фаза неинформативна), так что не затронутая подвижками поверхность осталась за пределами кадра. Первичный анализ основного направления относительно широких полос на территории, расположенной к югу от разлома, говорит

о преимущественном направлении смещения на восток, а на территории, расположенной к северу от него — о движении на запад, что соответствует левостороннему сдвигу [6]. Разлом располагается на границе Аравийской и Анатолийской литосферных плит, первая из которых смещается к северу, выдавливая вторую в западном направлении, к Средиземному морю. Оценка скорости постоянных смещений вдоль Восточно-Анатолийского разлома по геологическим данным и измерениям GPS варьирует от 6–10 мм/год до 25–35 мм/год [7].

Более детально район вблизи эпицентра, обозначенного звёздочкой на рис. 1, можно рассмотреть на рис. 2. Изменение цвета к более светлым тонам соответствует удалению смещённой поверхности от радара за время между съёмками, изменение к более тёмным — приближению. В правом нижнем углу рис. 2 хорошо различима система почти параллельных полос с нарастанием частоты полос к верхней части рисунка и плавным изменением цвета в пределах каждой полосы от чёрного к белому. Это соответствует первичной оценке хода смещений к югу от разлома в западном направлении. В остальной части фрагмента полосы собраны в дугообразные и кольцевые структуры, причём в центрах одних структур мы видим изменение тона в тёмную сторону, а в центре других — в светлую, что означает смещения в противоположных направлениях.

Для оценки полных смещений необходимо произвести устранение 2π -неоднозначности на интерферограмме (операцию развёртки фазы). Однако, как видно на рис. 2, участки декорреляции (случайной фазы) и сложной конфигурации полос делают результат процесса двумерной развёртки ненадёжным, с возможными многочисленными ошибками на цикл (2π) в местах слипания, разрыва или отсутствия полос, что при интегрировании даст накапливающуюся ошибку. Приблизительные оценки количества полос дают до 70-90 циклов от периферии южного крыла сдвига к зоне разлома, что соответствует 2-2.5 м смещения в направлении на спутник. Истинные величины смещений зависят от их реального направления, но всегда их модуль не меньше, чем их проекция на линию визирования. Северное крыло более зашумлено и труднее поддаётся оценке, однако и там имеется не менее полусотни циклов. Это соответствует заявленным в СМИ величинам смещений вблизи разлома порядка 3 м [6].

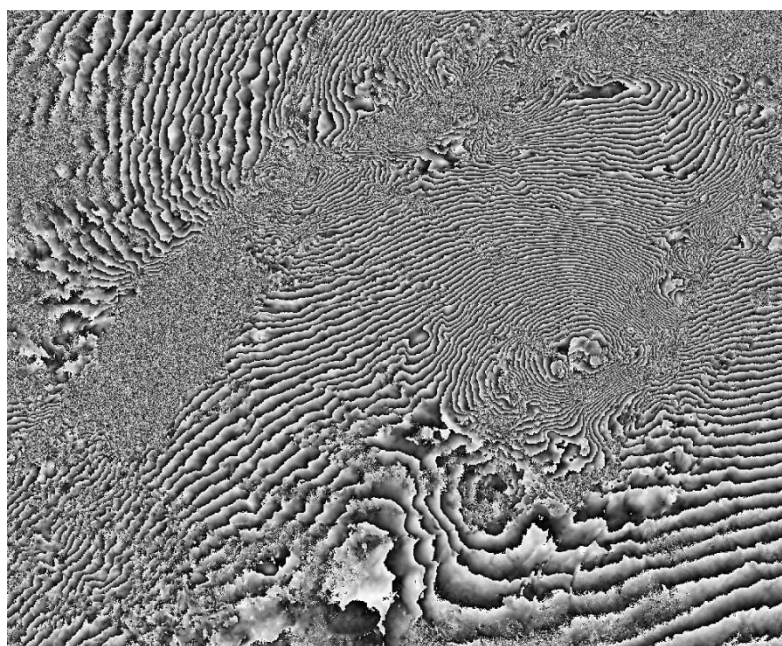


Рис. 2. Фрагмент интерферограммы вблизи эпицентра, размер фрагмента 45×35 км

В отличие от районов, близких к линии разлома, на периферии интерферограммы ход разности фаз замедлен (см. верхнюю левую часть рис. 1). На этом фоне ярко выделяются локальные неоднородности фазы, имеющие небольшие пространственные размеры, которые на участках с быстрым ходом фазы остались бы незамеченными: отметим, например, чёрный прямоугольник на рис. 1, повторенный в увеличенном масштабе на рис. 3. Это небольшой фрагмент интерферограммы по сельской территории к югу от города Адана. Здесь наблюдается кольцевая структура с убыванием значения разности фаз к центру колец, что в принятой схеме обработки означает приближение центра колец к радару. Таким образом, можно предположить поднятие поверхности — сильнее выраженное к центру, слабее по краям, — вызванное, вероятно, просачиванием воды из окружающих каналов и вызвавшее набухание участка поверхности. Величина разности фаз между центром и краями составляет около 12π , таким образом, проекция смещения на линию визирования составляет 16.8 см, что при пересчёте в строго вертикальное смещение для угла обзора 40° даёт 21.9 см. Таким образом, мы наблюдаем небольшое по величине воздымание (два десятка см в максимальной точке) на площадке с диаметром около 4 км.

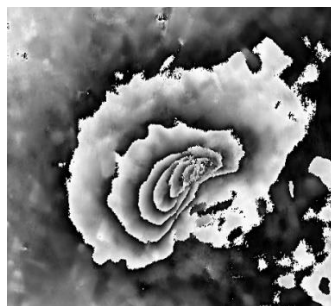


Рис. 3. Фрагмент интерферограммы вблизи г. Адана, размер 7×6 км

Выводы

Подводя итоги предварительной обработки, можно отметить, что на полученной интерферограмме запечатлены основные косейсмические деформации, произошедшие в результате двух самых сильных землетрясений 6 февраля 2023 года и афтершоков следующих трёх суток. Смещение поверхности вдоль линии разлома достигает 2.5 м в радиальном направлении, величина смещения спадает по мере удаления от разлома. Сильные деформации поверхности вблизи разлома приводят к потере когерентности отражённых сигналов интерферометрической пары, а также к слипанию соседних интерферометрических полос и их разрывам, что местами делает невозможным точное измерение величины подвижек. Тем не менее, приблизительные оценки радиальных смещений соответствуют приведённым в СМИ величинам, полученным на основе других источников данных. Также отмечены мелкомасштабные элементы динамики поверхности величиной в первые десятки сантиметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Авторы выражают благодарность ЕКА за предоставленные данные Sentinel-1A.

Литература

1. Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature*. 1993. 364: 138–142.

2. Fruneau B., Achache J., Delacourt C. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR inter-ferometry. *Tectonophysics*. 1996. 265: 181–190.
3. Goldstein R. M., Engelhardi H., Kamb B., and Frolich R. M. Satellite radar interferometry for monitoring ice sheet motion: application to an Antarctic ice stream. *Science*, 1993. 262, 525–1530.
4. Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carbognin, L., Ceccon,i G., Rosselli R., Libardo S. Resolving land subsidence within the Venice Lagoon by persistent scatterer SAR interferometry. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2012, Vol. 40–41, P. 72-79.
5. Zakharov, A.I., Epov, M.I., Mironov, V.L., Chymitdorzhiev, T.N., Seleznev, V.S., Emanov, A.F., Bykov, M.E., Cherepenin, V.A. Earth Surface Subsidence in the Kuznetsk Coal Basin Caused by Manmade and Natural Seismic Activity According to ALOS PALSAR Interferometry // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2013, 6(3): 1578–1583.
6. Хомякова Д. Землетрясения в Турции: возможен ли повтор? Наука в Сибири. Издание Сибирского Отделения Российской Академии Наук. 15 февраля 2023. <https://www.sbras.info/articles/mneniya/zemletryaseniya-v-turcii-vozmozen-li-povtor>.
7. Bozkurt E. Neotectonics of Turkey – a synthesis. *Geodinamica Acta*, 2001, 14:1-3, 3-30.