

Интерферометрическая оценка смещений поверхности в результате землетрясения 23.02.2023 в Таджикистане

Л.Н. Захарова¹, А.И. Захаров¹, А.Л. Стром²

¹ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники имени В.А. Котельникова РАН (ФИРЭ РАН)

141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. Введенского, 1

E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

² Научно-исследовательский институт гидротехнических сооружений - филиал АО «Институт Гидропроект»

123562, г. Москва, Строительный пр., д 7а;

E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

Представлены результаты интерферометрической обработки данных космического радиолокатора Sentinel-1A по территории Восточного Таджикистана, включающей район озера Сарез. Проанализирована интерферометрическая когерентность для двух пар радиолокационных снимков, охватывающих момент землетрясения 23.02.2023, снятых с восходящего и нисходящего витков носителя. Проведена оценка возможностей интерферометрической обработки данных С-диапазона в период дневных околонулевых температур в регионе. Приведены результаты оценки подвижности берегов озера Сарез, подверженных оползневой опасности, в результате этого землетрясения.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, интерферометрическая когерентность, смещения вдоль линии визирования, землетрясение, оползень

Interferometric assessment of surface displacements due to 23.02.2023 earthquake in Tajikistan

L.N. Zakharova¹, A.I. Zakharov¹, A.L. Strom²

¹ Fryazino branch of Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian academy of Sciences.

E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

² Scientific-research institute of the hydraulic structures - branch of JSC "Hydroproect"

123562, Moscow, Stroitelny drive, 7a

E-mail: strom.alexandr@yandex.ru

The paper presents the results of processing of interferometric pairs acquired by Sentinel-1 spaceborne radar for the eastern Tajikistan embracing the Sarez Lake area. The interferometric coherence of ascending and descending pair spanning the earthquake is analyzed. The possibility of interferometric processing of C-band radar data in the area during the period of the daylight near to zero temperatures is estimated. The results of earthquake-induced surface displacements on Sarez lake banks are presented.

Keywords: synthetic aperture radar interferometry (InSAR), interferometric coherence, line-of-sight displacements, earthquake, landslide

Введение

В три последние десятилетия благодаря регулярной съёмке всей поверхности Земли со спутниковых радиолокаторов в режиме интерферометрии научное сообщество имеет возможность оценивать происходящие на поверхности планеты изменения и их последствия. Среди причин таких изменений землетрясения выделяют как одни из

наиболее опасных, и поэтому они относятся к явлениям, которые подвержены пристальному вниманию. В настоящей работе приводится интерферометрический анализ смещений поверхности вследствие землетрясения, произошедшего 23.02.2023 г. на территории Таджикистана, по данным радиолокатора С-диапазона Sentinel-1.

Общая картина землетрясения по интерферометрическим измерениям

По данным Геологической службы США, землетрясение магнитудой $M_w=6.9$ произошло 23 февраля 2023 г. в 5:37 утра по местному времени. Гипоцентр землетрясения располагался на глубине около 9 км, эпицентр находится в 65 км к западу-юго-западу от поселка Мургаб в Таджикистане, координаты эпицентра 38.055° с.ш., 73.229° в.д. По данным службы срочных донесений ЕГС РАН координаты эпицентра 38.18° с.ш., 73.20° в.д., магнитуда $M_s=7.1$, глубина 20 км.

В исследовании использованы данные радара, установленного на борту космического аппарата Sentinel-1A (Европейское Космическое Агентство). Это радиолокатор С-диапазона (длина волны 5.6 см) с периодом повторной съёмки 12 суток. Были обработаны пары изображений с восходящего (15 и 27 февраля) и нисходящего (22 февраля и 5 марта) витков носителя, охватывающие момент землетрясения. В этой геометрии съёмки угол обзора в центре кадра составляет приблизительно 40° , что в гористой местности приводит к эффектам сжатия на изображении склонов, обращённых к спутнику, растяжения и затенения обратных склонов и наложения откликов от разных фрагментов поверхности друг на друга.

Особенностью съёмки с повторяющихся орбит является временная декорреляция, которая может стать непреодолимым препятствием при попытке извлечь информацию о смещении при интерферометрической обработке изображений. В работах [1,2] показано, что сигнал С-диапазона проникает в ледовые покровы на глубину 1-2 м, в слой фирна — до 10 м, в сухой свежий снег — до 20 м. Проникновение в слой влажного снега, по данным работы [3], невелико: менее 0.5 м.

Состояние снежного покрова, вероятно, оказалось причиной плохого качества материалов съёмки с восходящего витка в паре 15-27 февраля, которые выполнялись в 18:06 по местному времени. Метеостанция Мургаба сообщает об околонулевой дневной температуре воздуха в это время в регионе, в результате чего замерзание и оттаивание снежного покрова в зоне съёмки привело к временной декорреляции. Вследствие этого на полученной интерферограмме невозможно оценить последствия землетрясения: среднее значение интерферометрической когерентности по всему полю изображения составляет 0.2, что означает почти полную потерю фазовой информации.

Нисходящий виток оказался более удачным для целей работы. Съёмка происходила в 06:14 утра при низких температурах (-20°C и ниже), что обеспечило повторяемость условий рассеяния сигнала в двух сеансах съёмки и сравнительно высокую когерентность на большей части интерферограммы, так как в мороз сухой верхний слой снега радиопрозрачен, а рассеяние нижележащими средами более стабильно. Вблизи эпицентра землетрясения имеется область низкой когерентности овальной формы размером приблизительно 10 на 25 км, что позволяет предположить внутри неё смещения, существенно нарушившие микрорельеф поверхности и, следовательно, характер рассеяния сигнала (рис. 1). Однако вне её наблюдается устойчивая фазовая картина. К югу от эпицентра значения разности фаз растут, что соответствует смещению по направлению от радара. В предположении горизонтальных смещений это означает движение поверхности приблизительно в западном направлении. Севернее эпицентра расположена более обширная область с пониженными значениями разности фаз, соответствующими смещению в противоположном направлении. Оценка фазовых значений и последующий пересчёт в смещения вдоль линии визирования даёт

максимальные величины смещения от -28 см до $+14$ см. Эта величина является проекцией истинного смещения на линию визирования. В предположении горизонтального смещения это даёт около 42 см к западу в южной части и около 21 см к востоку в северной части.

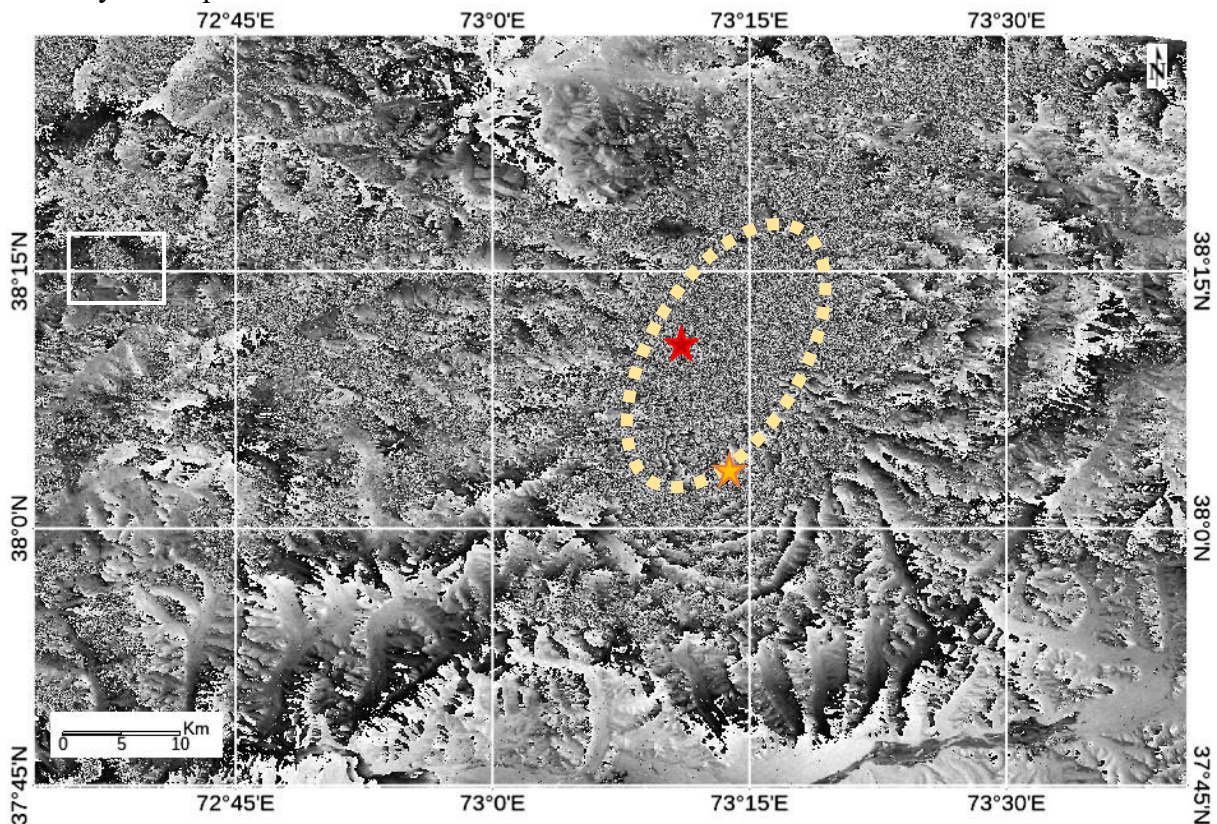


Рис. 1. Интерферограмма Sentinel-1 21.02.2023 – 05.03.2023. Звёздочками обозначен эпицентр землетрясения 23.02.2023: оранжевая — по данным USGS, красная — по данным ЕГС РАН; пунктиром околнурена область низкой когерентности вблизи эпицентра; белой рамкой показано положение фрагмента на рис. 3

Локальные последствия: Сарезское озеро

Примерно в 50 км западнее эпицентра землетрясения 23.02.2023 располагается головная часть Сарезского озера (рис. 2), образовавшегося в 1911 году результате землетрясения, вызвавшего оползень, который полностью перекрыл русло реки Мургаб. Берега современного озера сохраняют оползневую опасность [4].



Рис. 2. Оптическое изображение западной части Сарезского озера (Google Earth)

Фрагмент интерферограммы, включающий северо-западную оконечность озера Сарез, непосредственно примыкающую к завалу, приведён на рис. 3. Водная поверхность озера полностью декоррелировала на интерферограмме с интервалом 12 дней и представляет собой шумное пятно по центру изображения, уходящее в правый нижний угол; отдельные фрагменты суши также подвержены декорреляции вследствие эффектов переналожения изображений и радиотени, обычных для горных районов. При этом большая часть поверхности суши на рис. 3 демонстрирует устойчивую фазовую картину со средним значением интерферометрической когерентности 0.6. Среднее значение разности фаз составляет около -2 рад в северной части изображения на рис. 3 и около -1 рад в южной части, плавный ход фазы с севера на юг обусловлен общим смещением поверхности в результате землетрясения (см. рис. 1 в окрестностях белой рамки). При этом на левом берегу (в нижней части рис. 3) выделяется почти ромбовидная светлая область со средним значением разности фаз $+0.27$ рад и вариацией значений от -0.9 рад до $+1.5$ рад. Для верхней части этого склона, где отличия проявляются наиболее ярко, на рис. 4 приведён профиль разности фаз, проходящий на высоте 3750–3900 м (поверхность озера 3264 м н.у.м.).

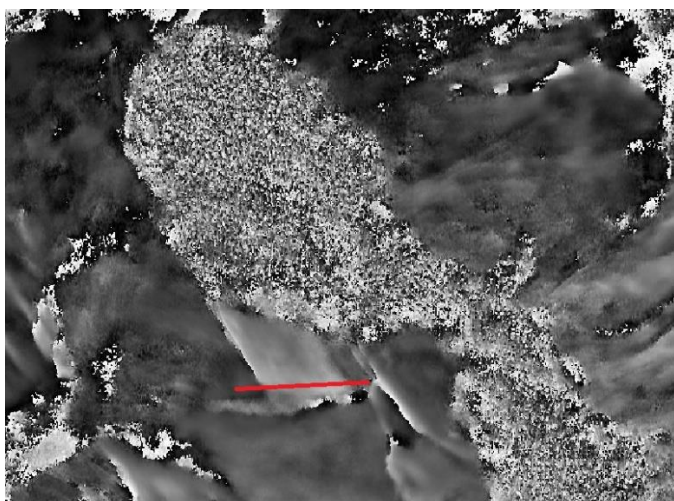


Рис. 3. Фрагмент интерферограммы; красным отрезком показано положение линии профиля на левом берегу

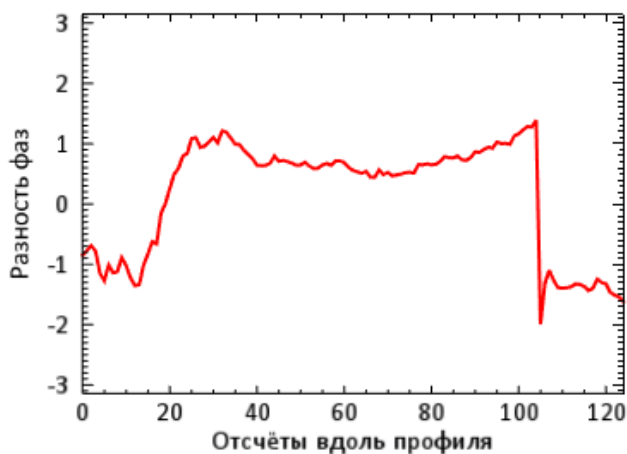


Рис. 4. Профиль разности фаз на левобережном оползневом склоне

Максимальный перепад между значениями разности фаз на оползневом склоне и соседними склонами составляет 2.5 рад, что соответствует 22 мм смещения от радара в

проекции на линию визирования. Принимая за наиболее вероятное направление смещения вектор, направленный вниз по склону, и учитывая угол между линией визирования и этим вектором, получаем оценку истинного смещения 73 мм за 12 дней, прошедших между съёмками. В нижней части склона, на высоте 3300–3400 м (т.е. 50–150 м над уровнем воды в озере), отличие разности фаз на аналогичном профиле составляет вдвое меньшую величину. Таким образом, смещение поверхности вблизи воды составляет около 1 см в проекции на линию визирования, или 3.3 см по градиенту склона.

В [5] приведена оценка динамики оползневых склонов Сарезского озера, вычисленные по данным Sentinel-1 за 2015–2020 гг. Для верхней части левобережного оползня измеренная вертикальная скорость составляет 240 мм/год, или 8 мм за 12 дней, что в девять раз меньше, чем на интерферограмме, охватывающей землетрясение. Для точки в нижней части склона опубликованная в [5] вертикальная скорость составляет 149 мм/год, или 5 мм за 12 дней, что в шесть раз меньше измеренного за период, включающий землетрясение. Таким образом, полученное за 12 дней февраля 2023 года смещение является по-видимому, результатом оползневого процесса, активизированного в результате землетрясения, произошедшего между съёмками.

Для уточнения параметров движения левобережного оползня необходимы дальнейшие исследования с использованием долговременной серии современных радиолокационных изображений.

Выводы

В результате обработки данных С-диапазона получены величины смещения поверхности в проекции на линию визирования. В условиях февральской погоды пригодными для получения результатов оказались съёмки только с нисходящего витка, проводимые в утреннее морозное время. Максимальные смещения в результате землетрясения в области, не подверженной декорреляции, составили –28 см и +14 см в проекции на линию визирования. Обнаруженное смещение оползневого склона на левом берегу Сарезского озера (22 мм за 12 дней) выходит далеко за рамки среднегодовых значений и требует дальнейших исследований.

Работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Литература

1. E. Rignot, K. Echelmeyer, and W. Krabill. Penetration depth of interferometric synthetic aperture radar signals in snow and ice// *Geophys. Res. Lett.* 2001. Vol. 28. № 18. P. 3501–3504.
2. Hoen E.W. and Zebker H. Penetration depths inferred from interferometric volume decorrelation observed over the Greenland ice sheet// *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 38, no. 6, pp. 2572– 2583, Nov. 2000.
3. Leinss S., Antropov O., Vehviläinen J., Lemmetyinen J., Hajnsek I. and Praks J. Wet Snow Depth from Tandem-X Single-Pass Insar Dem Differencing // *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Valencia, Spain, 2018. P. 8500–8503. DOI: 10.1109/IGARSS.2018.8518661.
4. Ищук Н.Р., Стром А.Л. Геологические последствия землетрясения 7 декабря 2015 года на Сарезском озере// *Геориск*, издательство Геомаркетинг (М.). 2016. № 3. С. 56–65.
5. Nardini, O., Confuorto, P., Intrieri, E. et al. Integration of satellite SAR and optical acquisitions for the characterization of the Lake Sarez landslides in Tajikistan. *Landslides*. 2024. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02214-y>.