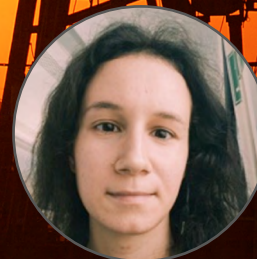


**Назаров Р. Р.**

Директор компании ООО «Эридан»
eridangeo@yandex.ru

**Гилаев Д.М.**

Начальник отдела топографо-геодезических и маркшейдерских работ – заместитель начальника УТГИМР СП «Татнефть-Добыча» ПАО «Татнефть»
gilaeedm@tatneft.ru

**Булатова Л.И.**

Инженер-геодезист в компании ООО «Эридан»
louisa3481@gmail.com

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ТЕРРИТОРИИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ПАО «ТАТНЕФТЬ» МЕТОДОМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ SBAS

В последние годы достижения в области дифференциальной радиолокационной интерферометрии создали новые подходы к мониторингу смещений земной поверхности, деформации зданий и сооружений. Как одна из важных технологий наблюдения Земли, дифференциальная радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (DInSAR), успешно использовалась для мониторинга деформации поверхности. В данной работе будет описан опыт применения метода радарной интерферометрии SBAS на участке с активной добычей нефти и газа. Описаны особенности метода, набор данных, выбранных для исследования, порядок выполнения обработки радарных снимков и приведён анализ полученных результатов.

Ключевые слова: радарная интерферометрия, метод SBAS, деформация.

Добыча полезных ископаемых несёт с собой существенное воздействие на геологическую среду. Участки земной поверхности, подвергшиеся деформациям, повышают уровень сейсмичности данного участка [1]. В связи с рисками деформационных явлений на территории деятельности ПАО «Татнефть» проводятся мероприятия по мониторингу районов с активной добычей нефти. Применяются несколько методов за наблюдением состояния земной поверхности и выявлением деформационных явлений. Классический метод – геометрическое нивелирование 2 класса. Линии нивелирных сетей проходят через участки, в которых проводятся активные процессы добычи нефти. Также нивелирная сеть 2 класса построена и реализована в Альметьевске. Второй метод – это использование спутниковых геодезических технологий. Референсные базовые ГНСС-станции применяют для мониторинга земной поверхности на геодинамических полигонах [2]. На протяжении последних двух лет мониторинг земной поверхности также проводится методом радарной интерферометрии. В нефтегазовой сфере, дифференциальная радарная интерферометрия, зарекомендовала себя как эффективный инструмент для мониторинга движения поверхности земли, способный охватывать большие площади при низких затратах и в пространственных масштабах, недостижимых при традиционных методах наблюдений [3].

Методология

Дифференциальная радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (DInSAR) – это метод микроволнового дистанционного зондирования, который позволяет нам исследовать явления поверхностной деформации с точностью от сантиметра до миллиметра, и обладающий большим пространственным охватом. В частности, метод DInSAR использует разность фаз, часто называемую интерферограммой, между двумя радарными изображениями, имеющими отношение к разнесённым по времени наблюдениям за исследуемой областью. Возможность изучения временной эволюции обнаруженных смещений является ключевым вопросом, имеющим важное значение для понимания динамики деформационных явлений.

Существует четыре метода дифференциальной радарной интерферометрии по определению деформационных явлений:

- метод устойчивых отражателей (Persistent Scatterers Interferometry – PSI),
- метод малых базовых линий (Small Baseline Subset – SBAS),

- комбинированный метод, включающий PSI и SBAS,
- метод SqueeSAR.

В данной работе будут исследованы возможности метода SBAS, его особенности и преимущества. Метод SBAS – это метод DInSAR, позволяющий обнаруживать деформации земной поверхности и, прежде всего, анализировать их временную эволюцию. В частности, он основан на использовании большого количества радарных данных и реализует простую комбинацию интерферограмм, рассчитанных на основе этих данных, что, в конечном итоге, приводит к созданию карт средней скорости деформации. Метод SBAS основан на совместном использовании длинных временных серий радарных изображений (т.е. изображений высокой кратности, полученных в повторяющейся геометрии съёмки), позволяют ослабить влияние эффектов пространственной и временной декорреляции и атмосферных искажений, тем самым повысить точность измерений рельефа и подвижек отражающей поверхности [4]. Большое количество радарных снимков комбинируются в пары с небольшим орбитальным разделением (то есть базовой линией, предельное значение которой устанавливается вручную), чтобы уменьшить пространственную декорреляцию. Данная особенность позволяет увеличить временную частоту дискретизации мониторинга, и высокую степень пространственного охвата по интересующей области, связанную с использованием только небольших базовых интерферограмм [5].

Обработка входных радарных изображений делится на два этапа. В первой части происходит коррегистрация всех сформированных пар, генерирование интерферограмм. Первая часть обработки реализована в программном продукте SNAP, разработанное Европейским Космическим Агентством (ESA) [6]. Вторая часть обработки включает в себя следующие шаги:

- Идентификация устойчивых отражателей. Здесь используются значения амплитуды и фазы для оценки вероятности устойчивого отражения для каждого пикселя. Вначале делается выбор, основанный только на амплитуде, затем он уточняется с использованием фазы методом итераций. По окончании итераций определяется вероятность и для тех пикселей, которые не были включены в итерационный процесс.

- Отбор устойчивых отражателей. Выбираются отражатели, имеющие высокую вероятность, и отбрасываются те, которые устойчивы только на некоторых интерферограммах и те, которые расположены в окрестности отражателей, имеющих большую вероятность.

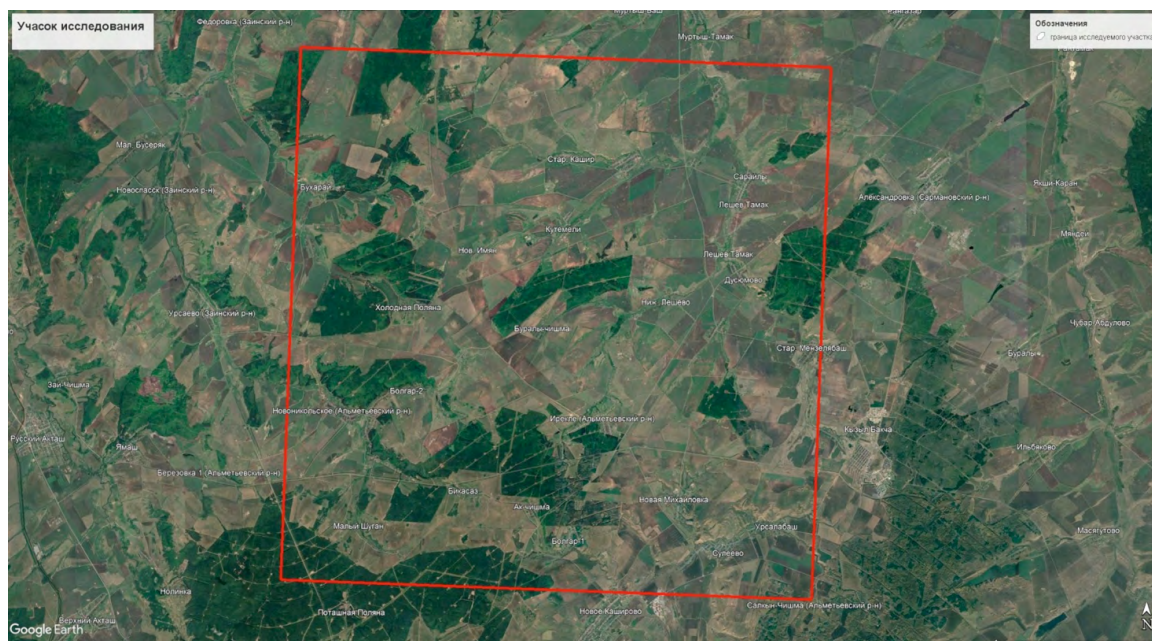


Рис. 1
Граница исследуемого участка

- Оценка полей смещений. Здесь проводится развёртка фазы и коррекция искажающих эффектов, вклад которых оценивался на предыдущих стадиях (ошибки, связанные с ЦМР, например).

Этапы второй ступени обработки реализованы в программе StaMPS/MTI (Stanford Method for Persistent Scatterers) [7]. StaMPS/MTI имеет открытую лицензию. Этот пакет был разработан в Стэнфордском Университете, а в настоящее время он поддерживается и развивается сотрудниками Делфтского технологического Университета (TU Delft).

Участок исследования

Для участка исследования (красный прямоугольник на *рисунке 1*) была выбрана территория с небольшими населёнными пунктами, преобладающая часть покрыта пашнями и полями. Данный участок выбран для определения возможностей метода SBAS на незастроенных территориях. Площадь участка составила 600 км².

Сбор данных

Для проведения данного исследования было использовано 35 радарных снимков формата – L1 SingleLookComplex и в режиме – InterferometricWideswath (IW) спутника Sentinel – 1B с нисходящей орбитой. Режим IW позволяет сочетать большую ширину полосы обзора (250 км) с геометрическим разрешением 5x20 м. Радарные снимки Sentinel – 1 являются открытыми данными [8], которые предоставляет европейское космическое агентство (ESA). Снимки были отобраны в период с 07 апреля 2020 года по 23 октября 2021 года (зимние снимки исключены). Список радарных снимков представлен в *Таблице 1*.

Обработка данных и получение результатов

Основными входными параметрами перед началом обработки является определение снимка-мастера, величины временной базовой линии и обозначение координат участка исследования. В качестве снимка-мастера был выбран снимок №21 (08 мая 2021) в *Таблице 1*. Величина временной базовой линии меньше, чем 400 дней. С выбранными параметрами было создано 209 пар интерферограмм. Схема связи пар отображена на *рисунке 2*.

Для удаления топографические фазы, была использована цифровая модель рельефа миссии Shuttle Radar с точностью до 1 угловой секунды (SRTM DEM 30 м). Фильтрация интерферограмм для дальнейшего уменьшения фазового шума было выполнено с помощью фильтра Goldstein. 3-D фазовый метод был применён для развёртки интерферометрической фазы деформации. Было получено 43 тысячи устойчивых отражателей. Скорость смещения земной поверхности (LOS) изменяется от -19 мм/год до +13 мм/год.

Анализ деформационных явлений

На *рисунке 3* представлены полученные результаты для исследуемой территории. Для значительной части участка скорость смещения земной поверхности изменяется от -5 до +5 мм/год (устойчивые отражатели жёлтого цвета на *рис. 3*). Плотность устойчивых отражателей оказалась высокой и составила 107 точек на 1 км². Не были выявлены устойчивые отражатели на участках густой растительности, как видно из *рис. 3*, количество отражателей внутри лесного массива

Таблица. 1
 Список радарных снимков спутника Sentinel – 1B

№ снимка	Дата (г/м/д)	№ снимка	Дата (г/м/д)
1	2020/04/07	18	2021/04/02
2	2020/04/19	19	2021/04/14
3	2020/05/01	20	2021/04/26
4	2020/05/13	21	2021/05/08
5	2020/06/06	22	2021/05/20
6	2020/06/18	23	2021/06/01
7	2020/06/30	24	2021/06/13
8	2020/07/12	25	2021/06/25
9	2020/07/24	26	2021/07/07
10	2020/08/05	27	2021/07/19
11	2020/08/17	28	2021/07/31
12	2020/08/29	29	2021/08/12
13	2020/09/10	30	2021/08/24
14	2020/09/22	31	2021/09/05
15	2020/10/04	32	2021/09/17
16	2020/10/16	33	2021/09/29
17	2020/10/28	34	2021/10/11
		35	2021/10/23

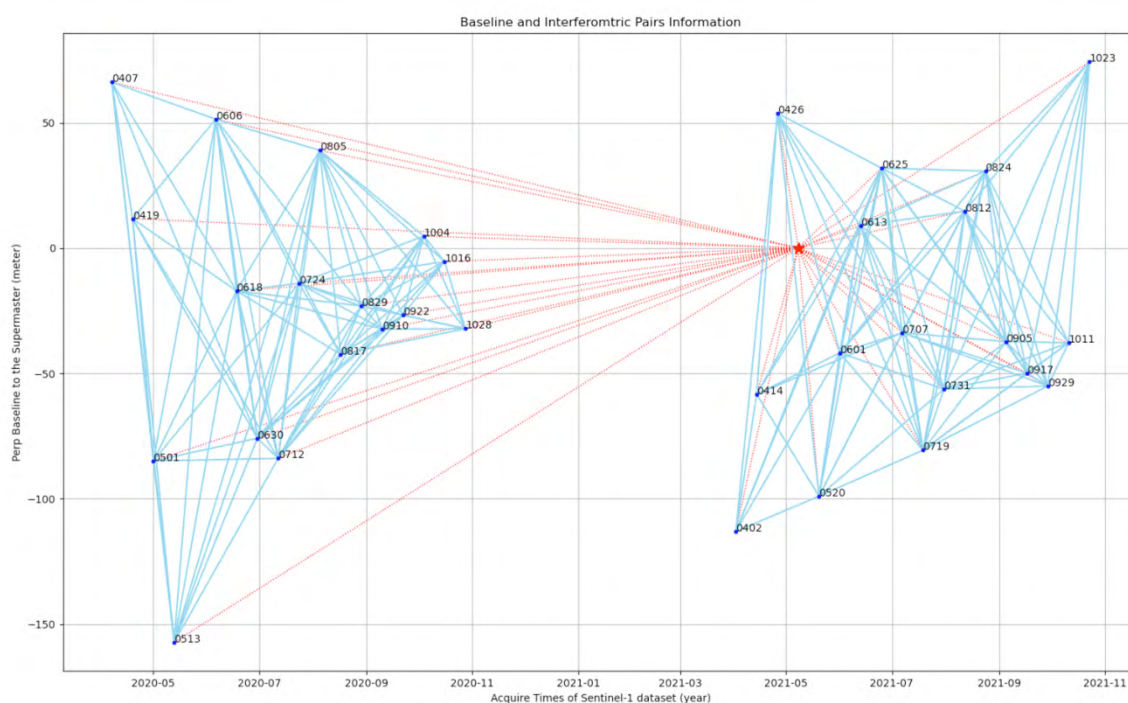


Рис. 2
 Сгенерированные пары интерферограмм. Ось X описывает временную базовую линию, ось Y – перпендикулярную базовую линию. Красной звездой обозначен снимок-мастер

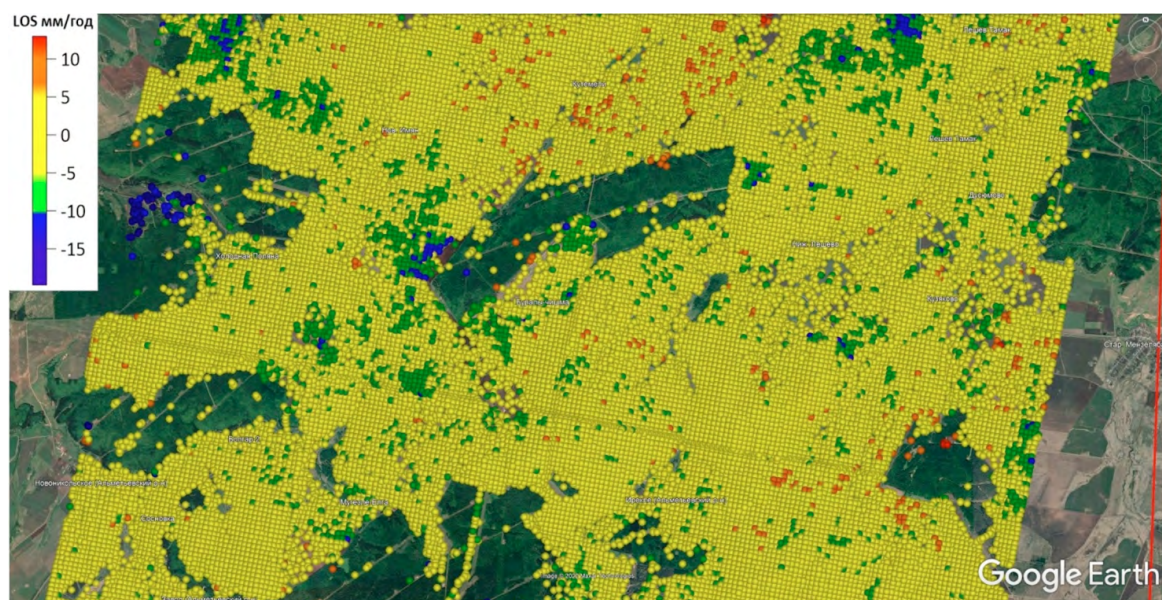


Рис. 3
Скорости смещения земной поверхности полученные методом SBAS для исследуемой территории

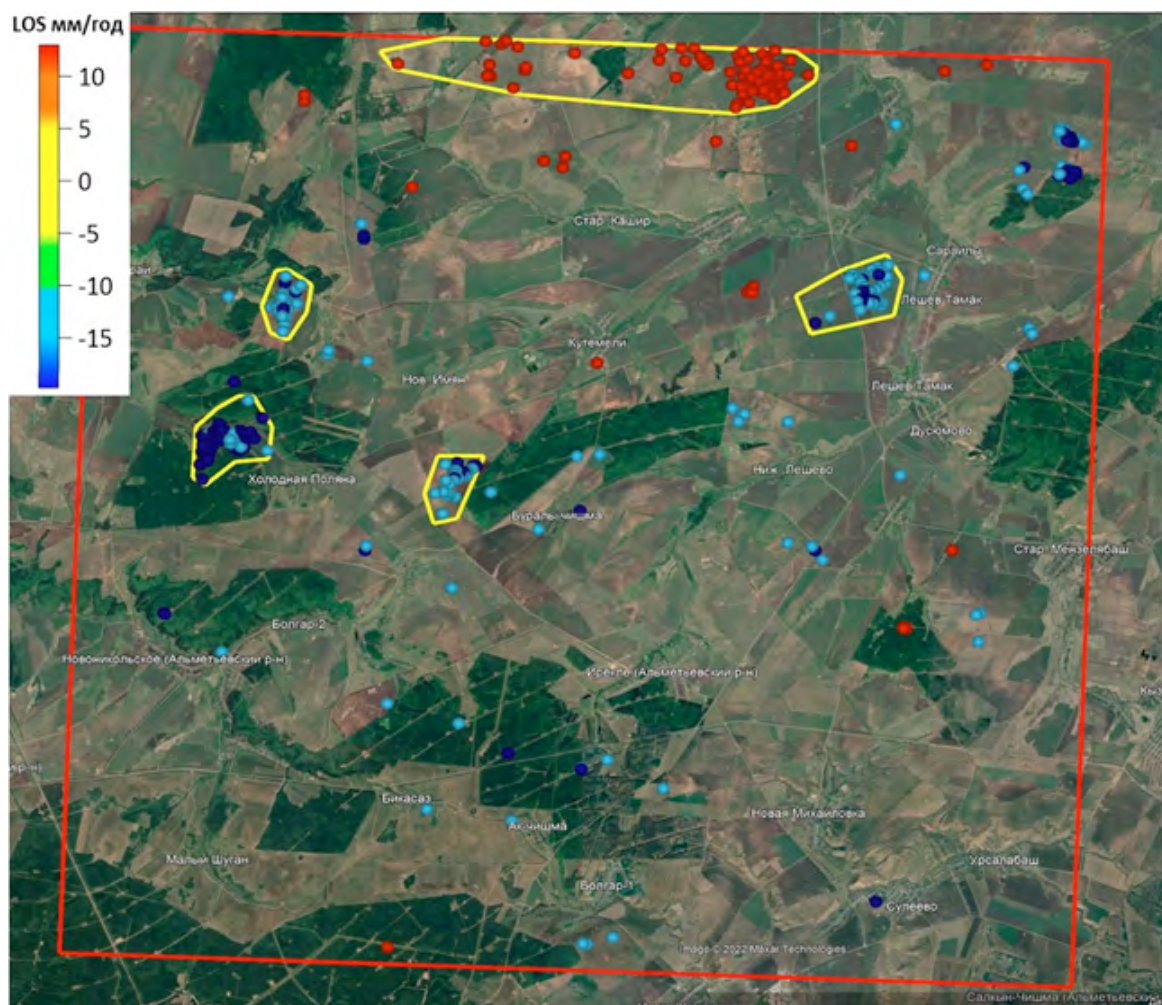


Рис. 4
Устойчивые отражатели, скорость смещения которых > 10 мм/год и < -10 мм/год.
Жёлтой границей выделены области со значимыми деформациями

на порядок ниже, чем в остальной области территории исследования.

Для определения расположения выявленных деформаций была выполнена фильтрация устойчивых отражателей. На *рисунке 4* представлены устойчивые отражатели в результате фильтрации. Пять участков можно выделить с определёнными деформационными явлениями (выделены жёлтой границей на *рис. 4*). Положительная деформация, выявленная в северной части участка, и четыре отрицательные деформации, расположенные в центральной части.

Заключение

В ходе проведённых работ по мониторингу геодинамических процессов на территории деятельности ПАО «Татнефть» методом радарной интерферометрии SBAS были получены скорости смещения земной поверхности. Было выбрано 35 радарных снимков спутника Sentinel – 1B за период с 07 апреля 2020 года

по 23 октября 2021 года. Метод SBAS продемонстрировал высокую плотность устойчивых отражателей на незастроенных территориях. Однако, в области лесных массивов устойчивых отражателей было выявлено в разы меньше. Такое скудное количество отражателей можно объяснить длиной волны, используемое на спутнике Sentinel – 1B. На спутнике установлен радиолокатор с синтезированной апертурой с длиной волны ~ 5.5 см (С-диапазон). Данный коротковолновой диапазон не проходит через густую растительность и испытывает серьёзную декорреляцию в данных областях. Исследование показало, метод радарной интерферометрии SBAS целесообразно и рентабельно использовать в нефтегазодобывающих районах. Выявление движения поверхности земли на территории нефтегазовых месторождений, в целом, может снизить риск возникновения потенциально опасных зон оседаний с соответствующим ущербом инфраструктуры. ❶

Литература

1. Говорушко С.М. Экологические проблемы добычи, транспортировки и переработки ископаемого топлива. Владивосток: Дальнаука, 2014.
2. Гилаев Д.М., Загретдинов А.А., Загретдинов Р.В. Опыт и перспективы использования ГНСС-технологий на месторождениях нефти и газа, Маркшейдерский вестник 2021, выпуск 2, с. 21.
3. Васильев Ю. В., Мисюрев Д. А., Филатов А. В. Техногенное влияние разработки комсомольского месторождения на современные деформационные процессы, Известия высших учебных заведений. Нефть и газ 2018, №2(128).
4. Феоктистов А.А., Захаров А.И., Гусев М.А., Денисов П.В. Экспериментальные исследования возможностей метода малых базовых линий с использованием данных PCA ASAR/ENVISAT и PALSAR/ALOS. Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы 2015, том 2, выпуск 3, с. 50-55.
5. Jin Baek, Sang-Wan Kim, Hyuck-Jin Park, Hyung-Sup Jung, Ki-Dong Kim, Jeong Woo Kim Analysis of ground subsidence in coal mining area using SAR interferometry Geosciences Journal Vol. 12, No. 3, p. 277 – 284, September 2008.
6. Science Toolbox Exploitation Platform SNAP <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
7. STAMPS <http://homepages.see.leeds.ac.uk/~earahoo/stamps/>
8. Copernicus Open Acces Hub: Terms and Conditions <https://scihub.copernicus.eu/twiki/do/view/SciHubWebPortal/TermsConditions>

UDC 528.88

L. I. Bulatova, A surveyor engineer in Eridan LLC, louisa3481@gmail.com

D. M. Gilaev, Head of the Department of Topographic-Geodesic and Surveying Works – Deputy Head of UTGIMR JV «Tatneft-Dobycha» PJSC «Tatneft», gilaevdm@tatneft.ru

R. R. Nazarov, A director of Eridan LLC, eridangeo@yandex.ru

SMALL-BASELINE RADAR INTERFEROMETRY APPROACH TO DETECT SURFACE SUBSIDENCE IN PJSC TATNEFT FIELDS

Abstract: In recent years, advances in the field of differential radar interferometry have created new approaches to monitoring displacements of the earth's surface, deformation of buildings and structures. As one of the important technologies for Earth observation, differential synthetic aperture radar interferometry (DInSAR) has been successfully used to monitor surface deformation. This paper will describe the experience of using the SBAS radar interferometry method in an area with active oil and gas production. The features of the method, the set of data selected for the study, the procedure for processing radar images are described, and the analysis of the results obtained is given.

Keywords: radar interferometry, SBAS approach, deformation.