

УДК 004.67

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ДАНЫХ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПО ТЕРРИТОРИИ КАМЧАТКИ

И. Г. Кашапов

Камчатский государственный университет имени Витуса Беринга, 683032,
г. Петропавловск-Камчатский, ул. Пограничная, 4
E-mail: Trenqt@gmail.com

В данной статье пойдет речь о радарной интерферометрии и о технической части обработки спутниковых радарных данных, спутника Sentinel-1A, так же приведены обработанные данные за разные периоды по северной части Камчатки.

Ключевые слова: InSAR, радарная интерферометрия, Sentinel-1A, GMTSAR, алгоритм обработки радарных данных.

© Кашапов И. Г., 2018

MSC 68-04

SOFTWARE OF DATA PROCESSING RADAR INTERFROMETRY ON THE TERRITORY OF KAMCHATKA

I. G. Kashapov

Vitus Bering Kamchatka State University, 683031, Petropavlovsk-Kamchatsky,
Pogranichnaya st., 4, Russia
E-mail: Trenqt@gmail.com

This article will deal with radar interferometry and the technical part of the processing of satellite radar data, the Sentinel-1A satellite, as well as the processed data for different periods along the northern part of Kamchatka.

Key words: InSAR, radar interferometry, Sentinel-1A, GMTSAR, radar data processing algorithm.

© Kashapov I. G., 2018

Введение

Интерферометрические спутники, работают с различным разрешением, в различных диапазонах длин волн и с различной частотой съемки одной и той же территории. Это определяет пространственное разрешение и зависимость от атмосферных и ионосферных помех, влияние растительности, снегового покрова и т.д. Интерферометрические данные хранятся в архивах и могут быть приобретены у космических агентств – владельцев спутников. Возможность использовать архивные данные является огромным преимуществом спутниковой интерферометрии, поскольку позволяет исследовать не только современные деформации, но и деформации за длительные периоды времени. Это важно потому, что для целого ряда процессов периоды активности могут быть разделены периодами длительного покоя.

Интерферометрическая методика предполагает наличие пары снимков одного участка земной поверхности, полученных с двух близких, локально параллельных орбит. Съемка второго изображения выполняется тем же спутником. По двум снимкам вычисляется комплексная интерферограмма, каждый элемент которой равен произведению обратно рассеянного сигнала первого снимка и комплексно сопряженного сигнала второго снимка, поэтому фаза каждого элемента комплексной интерферограммы равна разности фаз двух снимков.

Для того, чтобы оценить смещения по паре РСА-изображений (метод дифференциальной интерферометрии), надо, чтобы радарная съемка производилась с близких орбит, чтобы атмосферные и ионосферные помехи в моменты съемки были невелики и чтобы смещения за период между снимками составляли как минимум несколько сантиметров. Основными ограничивающими факторами РСА-интерферометрии по методу InSAR являются потеря корреляции (так называемая декорреляция) между сигналами, отраженными от одного и того же участка поверхности на повторных снимках. Это в основном происходит из-за большой базы интерферометра, т.е. большого расстояния между точками повторной съемки. Все это накладывает существенные ограничения на применение метода InSAR. С его помощью в основном исследовались землетрясения, внедрения больших объемов магмы, иногда просадки на нефтяных или газовых разработках, т.е. те процессы, где смещения достаточно велики.

Существенно расширилась область применения метода РСА интерферометрии после того, как были разработаны различные модификации метода устойчивых отражателей. Основная идея этого метода состоит в идентификации пикселей РСА-изображения, содержащих так называемые устойчивые отражатели - обратно рассеивающие элементы, для которых характерно слабое изменение значения когерентности на протяжении длинных временных интервалов. Если, как это обычно бывает, размеры устойчивых отражателей не превосходят размеров элемента разрешения, то значение когерентности является приемлемым даже для тех интерферограмм, для которых база интерферометра, близка к критическому значению. При этом в интерферометрические расчеты можно включить весь доступный набор РСА-снимков. Идентификация устойчивых отражателей позволяет оценить атмосферные помехи и устранить их из дифференциальных интерферограмм, что повышает точность оценок смещений земной поверхности. В методе А. Феретти устойчивые отражатели выделяются по результатам анализа поведения отражающих площадок во времени.

А. Хупер предложил метод, в котором проводится анализ распределения устойчивых отражателей по пространству. Этот метод свободен от гипотез о том, как меняется скорость смещения во времени. Позже был разработан метод малый базовых линий. Идея метода близка к подходу А. Хупера и состоит в поиске таких отражающих площадок, в которых влияние декорреляции и шумов минимально. Для таких пикселей производится разделение фазы, связанной с деформациями с фазовыми возникающими в результате атмосферных помех и неточности в ЦМР.

Мониторинг на основе РСА интерферометрии относительно дешев, не требует установки специального оборудования и проведения полевых работ, использование архивных снимков позволяет исследовать поведение объектов до и после катастрофических событий. Этим метод РСА интерферометрии выгодно отличается, например, от методов мониторинга с применением глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС - GLONASS и GPS). В то же время для получения надежных результатов по методу РСА интерферометрии необходимы контроль и калибровка с применением наземных данных. Наиболее надежные результаты дает совместная интерпретация данных РСА интерферометрии и спутниковой геодезии. В настоящее время для дистанционного получения информации о поверхности Земли используются оптические системы, фиксирующие отраженный от поверхности солнечный свет (пассивные системы) и радарные системы, которых облучают поверхность радиоволнами и регистрируют отраженные волны (активные системы).

Оптические системы регистрируют отраженное от поверхности Земли электромагнитное излучение Солнца в виде бесчисленных независимых световых волн или фотонов. Таким образом, каждый элемент результирующего изображения (пиксель) характеризуется яркостью — амплитудой зарегистрированного излучения или количеством фотонов. Использование радиоволн позволяет радарным системам «видеть» сквозь облачность и в темное время суток, что, например, делает возможным постоянный мониторинг ледовой обстановки во время полярной ночи. Однако еще более существенно то, что радары способны измерять не только амплитуду, но и точный момент колебаний — фазу отраженных волн. [1]

В данной работе используется спутник Sentinel-1A. Sentinel-1A - европейский радиолокационный спутник, запущенный 3 апреля 2014 года с космодрома Куру (Французская Гвиана) с помощью ракеты-носителя Союз. Это первый спутник космической программы Copernicus Европейского Космического Агентства (ESA). Спутник будет отслеживать различные аспекты нашей окружающей среды, от обнаружения и мониторинга разливов нефти и картирования морских льдов до мониторинга подвижек земной поверхности и картирования изменений используемых земель [2].

Установка пакета GMTSAR5 на ОС Ubuntu

GMTSAR – это пакет для обработки радарных снимков, основанный на утилитах GMT. GMT в свое время, является инструментом для создания карт GMTSAR является открытым исходным кодом (GNU GeneralPublicLicense) Система обработки InSAR предназначена для пользователей, знакомых с общими инструментами Mapping (GMT) . Код написан на языке C и компилируется на любом компьютере, где установлены GMT и NetCDF(предназначен для хранения научных данных (переменных), таких как температура, влажность, атмосферное давление, скорость

и направление ветра. Каждую из этих переменных можно отобразить с помощью измерения (например, времени) в ArcGIS, создав слой или табличное представление на основе файла netCDF.). Система состоит из трех основных компонентов.

GMTSAR (<http://topex.ucsd.edu/gmtsar>) – это пакет для обработки радарных снимков, основанный на утилитах GMT (Generic Mapping Tools, <http://gmt.soest.hawaii.edu>) - это инструмент для создания карт[3]. Рассмотрим основные команды для установки GMTSAR5. Далее приведена пошаговая инструкция. Для начала установим основные пакет в системе Ubuntu 16.04.

Установим основной пакет GMTSAR5:

```
sudo apt-get install csh subversion autoconf libtiff5-dev libhdf5-dev
sudo apt-get install liblapack-dev
sudo apt-get install gfortran
sudo apt-get install g++
sudo apt-get install libgmt-dev
sudo apt-get install gmt
```

Далее нам необходимо скачать дополнительный пакет для GMTSAR5, а именно ORBITS (орбиты) и установить его. Он необходим для обработки радарных данных. <http://topex.ucsd.edu/gmtsar/tar/ORBITS.tar>

```
sudo -i
cd /usr/local
mkdir orbits
cd orbits
tar -xvf sim/Downloads/ORBITS.tar
sudo -i
cd /usr/local
svn checkout svn://gmtserver.soest.hawaii.edu/GMTSAR/branches/5.4 GMTSAR
```

Следующими командами будем создавать и устанавливать GMTSAR5:

```
cd GMTSAR
autoconf
./configure --with-orbits-dir=/usr/local/orbits
make
make install
```

Далее добавляем исполнимые файлы к нашему пути, csh или tcsh.

```
cd GMTSAR
autoconf
```

```
./configure --with-orbits-dir=/usr/local/orbits
```

```
make
```

```
make install
```

или

```
cd~
```

```
export GMTSAR=/usr/local/GMTSAR
```

```
export PATH=$GMTSAR/bin:$PATH
```

Алгоритм обработки радарных данных

1) Для начала нам нужно будет зайти на сайт и зарегистрироваться:

<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>

2) После регистрации нужно зайти в личный кабинет. Выделяем интересующую нас область на карте и задаем параметры. Параметры должны задавать следующим образом:

а) Выбираем спутник Sentinel-1A (Mission: Sentinel-1);

б) В разделе SatellitePlatform (спутниковая платформа): выбираем S1A_* - так как мы будем пользоваться спутником Sentinel-1A;

в) Product Type (тип продукта): SLC - Single Look Complex состоят из сосредоточенных данных SAR, с использованием данных орбиты и ориентации спутника и предоставленных в геометрии нулевого доплеровского диапазона.

г) Polarisation (поляризация): VV - данная поляризация характеризуется очень низкими значениями для водной поверхности и значениями для объектов на поверхности воды;

д) SensorMode (Режим датчика): IW - Режим интерферометрического широкополосного режима является основным режимом захвата на суше.

Все остальные пункты ниже оставляем без изменения [4].

На рисунке 1 изображена форма для ввода параметров с заполненными полями. Для корректной обработки спутниковых данных нам необходимо два снимка. Например, если мы возьмем снимок датированный 07.01.2017, то следующим снимком мы должны взять с датой 07.25.2017. Так как период вращения спутника вокруг Земли составляет 24 дня. И нажимаем на лупу в левом верхнем углу, должно получиться следующее рисунок 2.

3) Далее нажимаем на кнопку скачивания данные. В результате нужно скачать два архива они могут быть как в формате .zip так и в формате .tar.

- 4) Скачиваем орбиту спутника Sentinel-1A для интересующих нас дат. Для этого необходимо зайти на сайт: https://qc.sentinel1.eo.esa.int/aux_poeorb. Справа будет выбор спутника, нам нужно выбрать S1A. Ниже выбираем год, месяц и из списка выбираем день. День нужно брать следующим образом. Допустим нам нужна орбита за 07.25.2017, выбираем из списка 2017, July и выбираем из списка 22-25. Видим слева орбиты, нам нужна: S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20170814T121532_V20170724T225942_20170726T005942.EOF. Отсюда видно, что наша орбита находится между 24 и 26 днями V20170724T225942_20170726T005942, и после скачивания меняем расширение на txt.

Например, изначально файл выглядит: S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20170814T121532_V20170724T225942_20170726T005942.EOF.

Тогда как после скачивания он должен выглядеть: S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20170814T121532_V20170724T225942_20170726T005942.EOF.txt

- 5) Далее нам нужен вспомогательный файл dem.grd. Для того чтобы получить этот файл необходимо. В архивах которые были скачаны ранее, пункт 3, есть файл manifest.safe. Нам нужен любой из двух архивов, так как координаты интересующие нас там будут одинаковые. Открываем его обычным блокнотом. Находим там такие строки, координаты могут отличаться от примера:

```
<gml:coordinates>55.440746,161.209045 55.843884,157.240921  
57.454472,157.686432 57.045898,161.827942</gml:coordinates>
```

Отсюда нам нужно выбрать максимальные значения. Из примера видим, что максимальные значения 57.454472 и 161.827942. Далее заходим на сайт:

<http://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen/>, видим 4 колонки north, east, west и south. В north вводим 57.454472 и сразу же в south вводим 53.454472, разница между границами не должна превышать более 4 градусов. В east вводим 161.827942 и в west 157.827942, после нажимаем generate. Через пару минут файл сформируется и будет доступна кнопка скачивания. Пример изображен на рисунке 3.

Рис. 1. Параметры данных

- 6) Так же необходим файл “config.s1a.txt”. Его можно скачать с сайта GMTSAR.
- 7) Размещаем все полученные файлы следующим образом:
- Первая папка “orig” — содержит необработанные, разархивированные, данные и орбиты.
 - Вторая папка “topo” — содержит файлы взятые с сайта <http://topex.ucsd.edu/gmtsar/demgen>
 - Создаем 2 файла сценария для обработки данных.

Первый файл — 01_run_prep.sh содержит следующий сценарий.

- будут содержаться комментарии.

```
mkdir raw
cd raw
cp ../orig/*.txt.
```

- ниже видим строки в которых мы даем ссылки на все xml и tiff файлы, S1A_IW_SLC__1SDV_20160202T100019_20160202T100049_009766_00E469_C190.SAFE — это название папки архива данных, ее мы и будем менять на свое, причем для xml и tiff одна и та же папка, так же делаем и для второй папки.

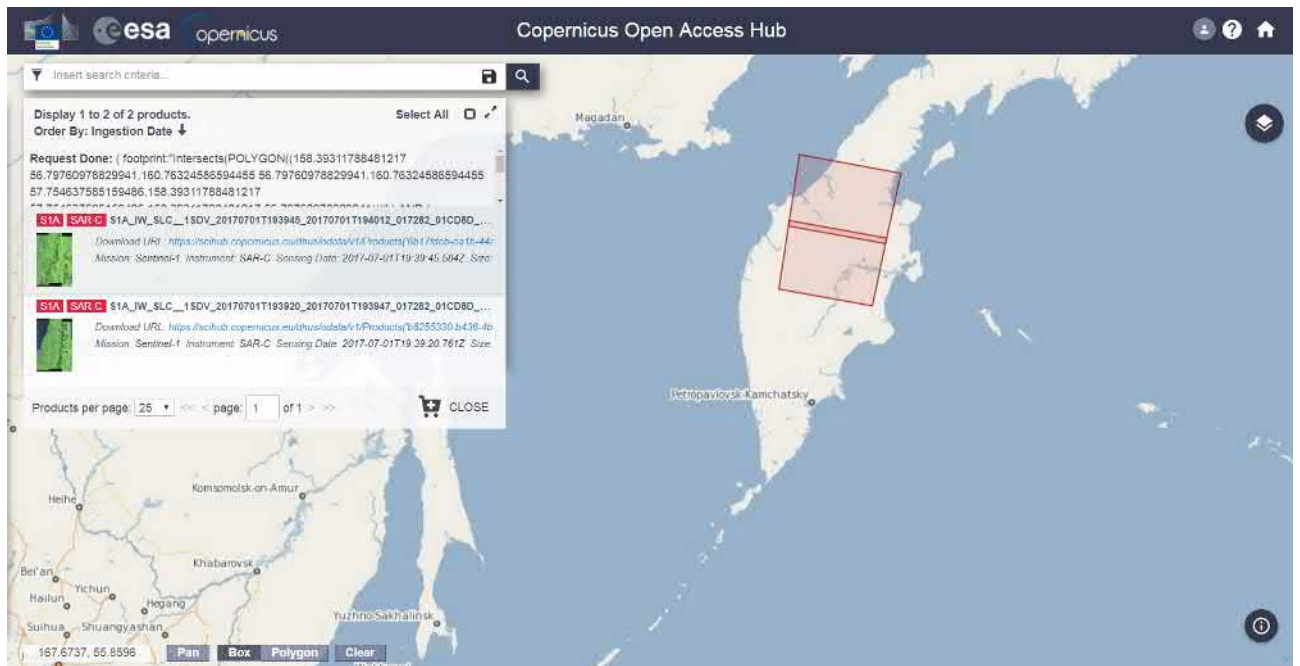


Рис. 2. Пример данных выбранной области

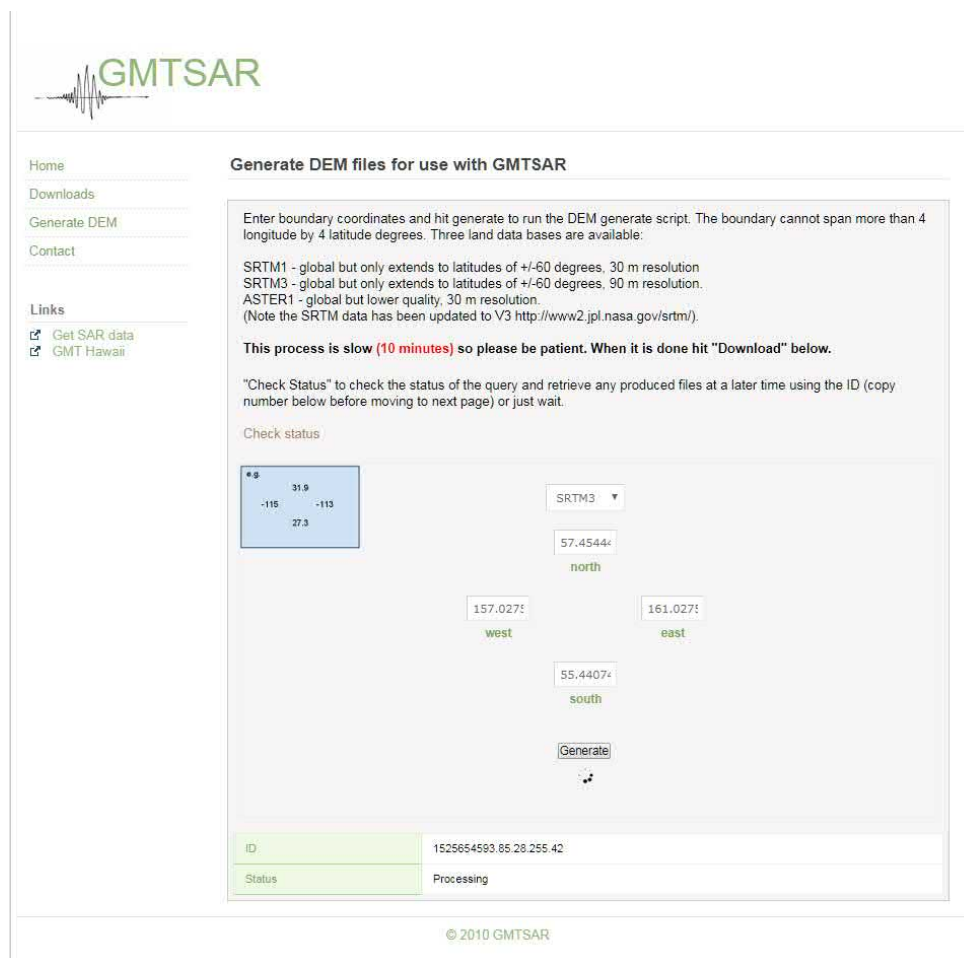


Рис. 3. Создание dem.grd


```
ln -s ../orig/S1A_IW_SLC__1SDV_20160202T100019_20160202T100049_009766
_00E469_C190.SAFE/annotation/*.xml .
ln -s ../orig/S1A_IW_SLC__1SDV_20160202T100019_20160202T100049_009766
_00E469_C190.SAFE/annotation/*.tiff .
ln -s ../orig/S1A_IW_SLC__1SDV_20160214T100019_20160214T100049_009941
_00E981_ABD9.SAFE/annotation/*.xml .
ln -s ../orig/S1A_IW_SLC__1SDV_20160214T100019_20160214T100049_009941
_00E981_ABD9.SAFE/annotation/*.tiff .
ln -s ../topo/dem.grd.
```

- здесь будем менять практически все

- 1) align_tops_esd.csh – оставляем без изменения
- 2) sla-iw1-slc-vv-20160202t100019-20160202t100047-009766-00e469-004 – заходим в папку, ранее архив, далее папка measurement, там видим данные нам нужны только с VV. Копируем название первой линии и вставляем без расширения tiff.
- 3) S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20160222T121629_V20160201T225943_20160203T005943.eof.txt – это наша орбита.
- 4) Далее все тоже самое только из другой папки с данными.
- 5) dem.grd – оставляем без изменения.
- 6) И так для всех трех линий.

- первая линия

```
align_tops_esd.cshsla-iw1-slc-vv-20160202t100019-20160202t100047-009766-00e469-004
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20160222T121629_V20160201T225943
20160203T005943.eof.txt
sla-iw1-slc-vv-20160214t100019-20160214t100047-009941-00e981-004 S1A_OPER_AUX
_POEORB_OPOD_20160305T121418_V20160213T225943_20160215T005943.eof.txtdem.grd
```

- вторая линия

```
align_tops_esd.cshsla-iw2-slc-vv-20160202t100020-20160202t100048-009766-00e469-005
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20160222T121629_V20160201T225943
_20160203T005943.eof.txt
sla-iw2-slc-vv-20160214t100020-20160214t100048-009941-00e981-005 S1A_OPER_AUX
_POEORB_OPOD_20160305T121418_V20160213T225943_20160215T005943.eof.txtdem.grd
```

- третья линия

```
align_tops_esd.cshsla-iw3-slc-vv-20160202t100021-20160202t100049-009766-00e469-006  
S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD_20160222T121629_V20160201T225943  
_20160203T005943.eof.txt  
sla-iw3-slc-vv-20160214t100021-20160214t100049-009941-00e981-006 S1A_OPER_AUX  
_POEORB_OPOD_20160305T121418_V20160213T225943_20160215T005943.eof.txtdem.grd
```

```
cd ..  
rm -r F1/raw  
mkdir F1  
cd F1  
ln -s ../config.sla.txt .  
mkdir raw  
cd raw  
ln -s ../../raw/*F1*.  
cd ..  
mkdir topo  
cd topo  
ln -s ../../topo/dem.grd  
cd ../../  
rm -r F2/raw  
mkdir F2  
cd F2  
ln -s ../config.sla.txt .  
mkdir raw  
cd raw  
ln -s ../../raw/*F2*.  
cd ..  
mkdir topo  
cd topo  
ln -s ../../topo/dem.grd.  
cd ../../  
rm -r F3/raw  
mkdir F3  
cd F3  
ln -s ../config.sla.txt .  
mkdir raw  
cd raw
```

```
ln -s ../../raw/*F3*
```

```
mkdir topo cd topo
```

Второй файл — 02_gun_proc.sh содержит следующий сценарий.

```
cd ../F1
```

- Редактируем:

- 1) p2p_S1A_TOPS.csh – оставляем без изменения.
- 2) S1A20160202_100019_F1 – эти строки появляются в терминале при начальной обработке, редактируем S1A20160202_100019_F1 и S1A20160214_100019_F1.
- 3) config.sla.txt – оставляем без изменения.
- 4) И так далее для остальных линий.

- первая линия

```
p2p_S1A_TOPS.csh S1A20160202_100019_F1 S1A20160214_100019_F1 config.sla.txt
```

- вторая линия

```
cd ../F2
```

```
p2p_S1A_TOPS.csh S1A20160202_100020_F2 S1A20160214_100020_F2 config.sla.txt
```

- третья линия

```
cd ../F3
```

```
p2p_S1A_TOPS.csh S1A20160202_100021_F3 S1A20160214_100021_F3 config.sla.txt
```

Анализ InSAR

В статье [5]: были проанализированы данные SAR по спутнику RADARSAT-1 с использованием программного пакета ROI_PAC, разработанного в JPL / Caltech. ROI_PAC - это программный пакет, созданный подразделением Лаборатории реактивного движения NASA и Caltech для обработки изображений SAR для создания изображений InSAR, называемых интерферограммами. ROI_PAC означает повторную орбитальную интерферометрию PACkage.

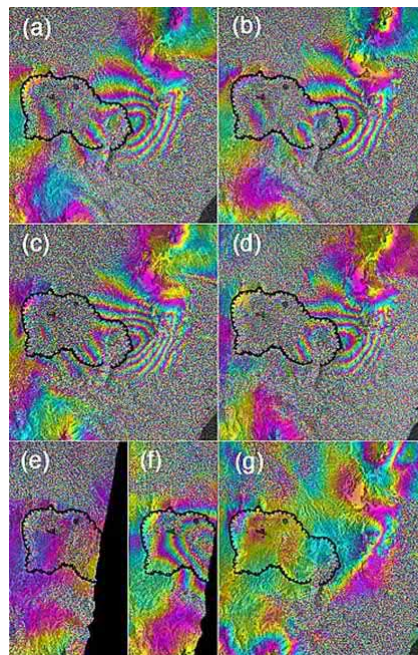


Рис. 4. SAR

Рисунок 4, каждый цветовой цикл представляет собой 2,8 см поверхностного смещения LOS. Штриховые линии обозначают ободок кальдеры. Для каждой показанной интерферограммы мы укажем даты изображений SAR, перпендикулярных базовых линий и пучка RADARSAT-1 и угла его падения поверхности в кальдере Узон. (a) 2000/08 / 23-2003 / 08/08. Вр = -54. Луч 7 (48 °). b) 2000/08 / 23-2004 / 09/19. Вр = 176. Луч 7 (48 °). c) 2000/09/19-2003 / 08/11. Вр = -58. Луч 4 (38 °). d) 2000/09 /16-2004 / 08/02 Вр = 126. Луч 7(48 °). e) 1999/09 / 08-2000/09/02. Вр = 483. Луч 6 (42 °). f) 2000/09 /02-2003 / 08/18. Вр = 218. Луч 6 (42 °). g) 2003/09 /04-2004 / 08/05. Вр = 80. Луч 4 (38 °). Значительная деформация обнаружена за период, охватывающий 2000-2003 гг. (рисунки 4а, 4с и 4f), тогда как с 1999 по 2000 г. (рисунок 4е) и с 2003 по 2004 г. (рисунок 4g) мы не обнаружили значительной деформации. Частичное покрытие, показанное на рисунке 4f, представляет собой те же данные InSAR. Как показано на рисунке 4, эти данные взяты из разных рядов и имеют разные углы падения земли. Независимые интерферограммы из разных рядов и разных дат показывают очень похожие деформации и амплитуды, несмотря на часто значимые атмосферные артефакты и проблемы с остаточными рампами из-за несовершенной базовой оценки. В частности, очевидна топографически коррелированная атмосферная фаза, которая либо добавляет (рис. 4b), либо вычитает из (рис. 4а, 4b и 4d) деформацию кальдеры в областях с более высокой топографией вокруг вулкана Кихпинич. Мы

обнаружили нерегулярную, плавно меняющуюся картину положительного движения ЛОС с максимальной амплитудой около 15 см в период с 2000 по 2003 год. В статье [6] рассматривали наилучшие когерентные интерферограммы для вулкана Кизимен. Брали SARизображения, в течение лета и осени (с середины июня и до середины октября), для того чтобы избежать потери когерентности из-за снега и льда. Исследования проводились используя два датчика, от спутников Envisat и Alos. Так же в статье приводится детальная SAR таблица.

Обработанные данные за разные периоды

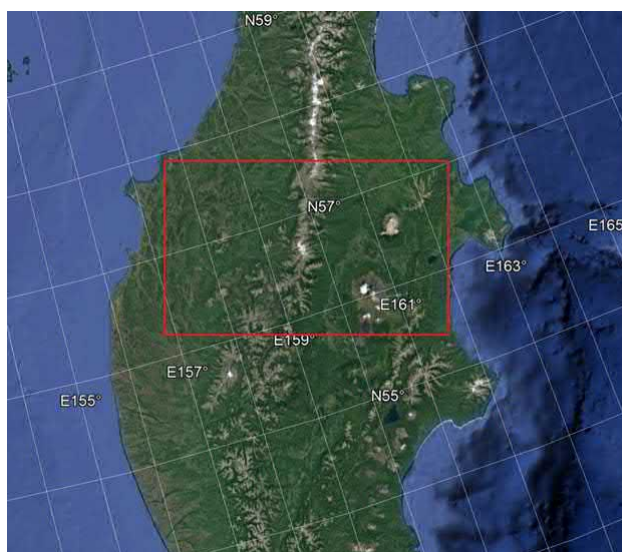


Рис. 5. Координаты обработанных данных, северная часть полуострова Камчатка.

Таблица 1

Зимний период

Дата съемки	Имя файла	Имя орбит	Сенсор
11.10.2017	S1A_IW_SLC__ISDV _20171110T193949 20171110T194016_019207 _020854_3232	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20171214T100043_V20171109T225942_ 20171111T005942.EOF	Sentinel- 1A
12.04.2017	S1A_IW_SLC__ISDV _20171204T193949 _20171204T194016_019557 _021355_4073	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20171224T121217_V20171203T225942_ 20171205T005942.EOF	Sentinel- 1A

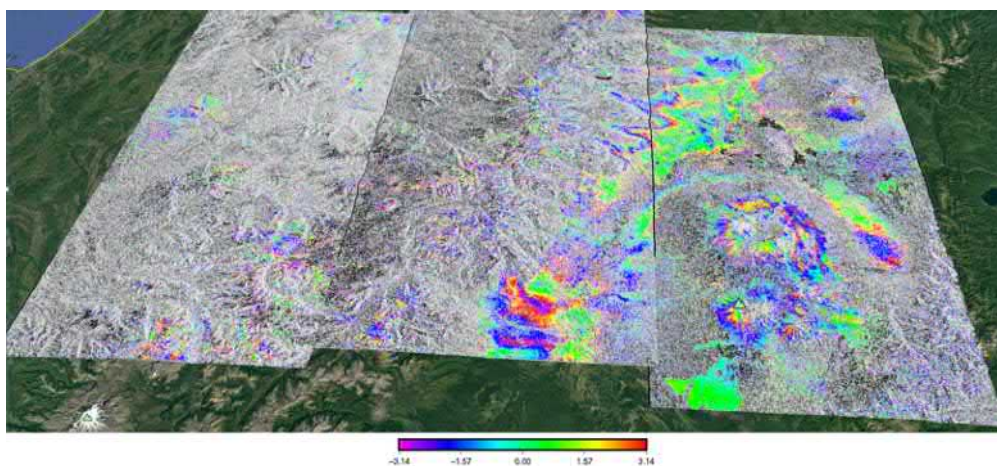


Рис. 6. Данные за период – 11.10.2017 – 12.04.2017 – фазовый портрет.

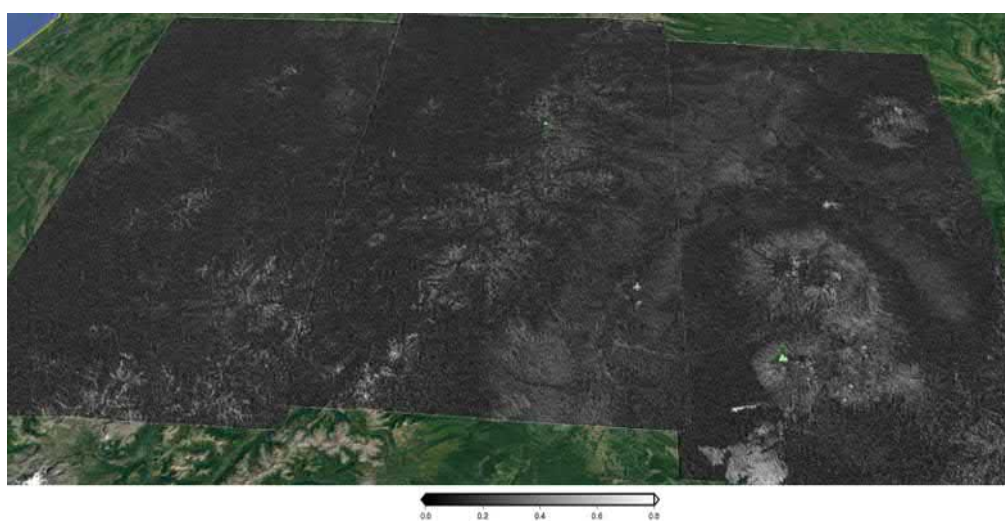


Рис. 7. Данные за период – 11.10.2017 – 12.04.2017 – корреляция.

Таблица 2

Летний период

Дата съемки	Имя файла	Имя орбит	Сенсор
07.01.2017	S1A_IW_SLC__ISDV _20170701T193945 _20170701T194012_017282 _01CD8D_B0B7	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20170721T121340_V20170630T225942_ 20170702T005942.EOF	Sentinel-1A
07.25.2017	S1A_IW_SLC__ISDV _20170725T193947 _20170725T194013_017632 _01D830_976A	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20170814T121532_V20170724T225942_ 20170726T005942.EOF	Sentinel-1A

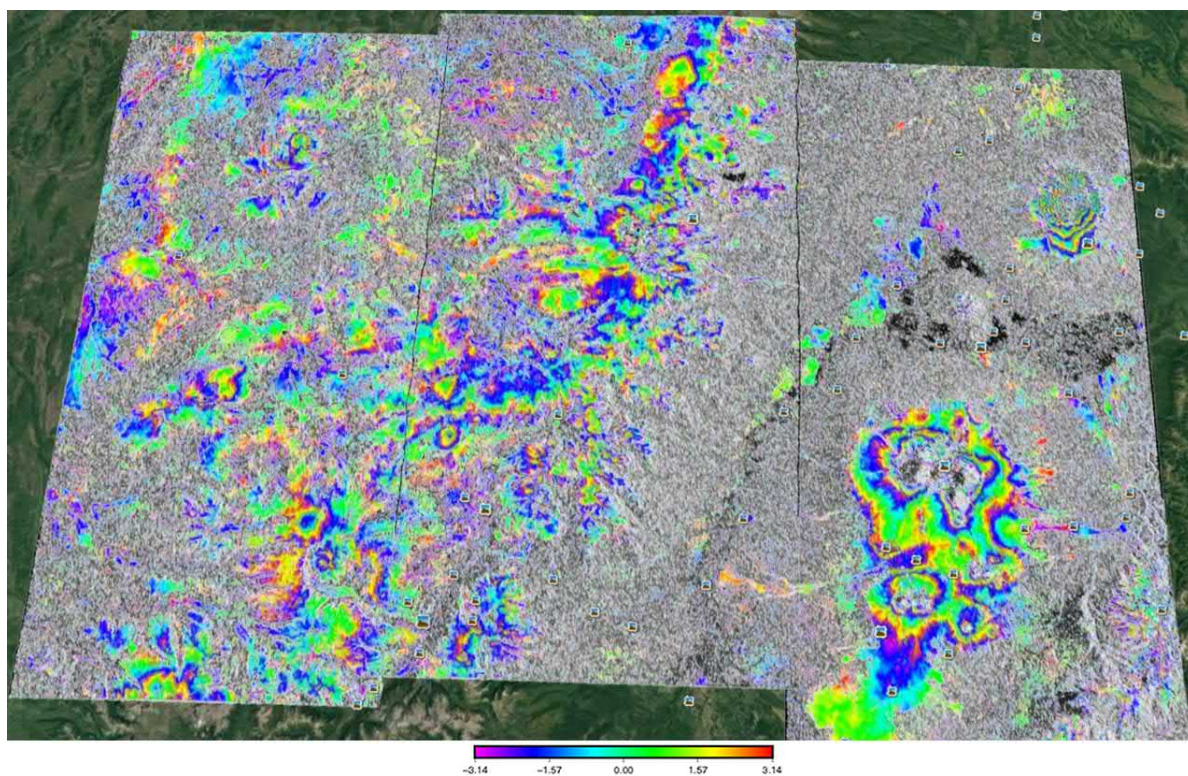


Рис. 8. Данные за период 07.01.2017- 07.25.2017 – фазовый портрет.

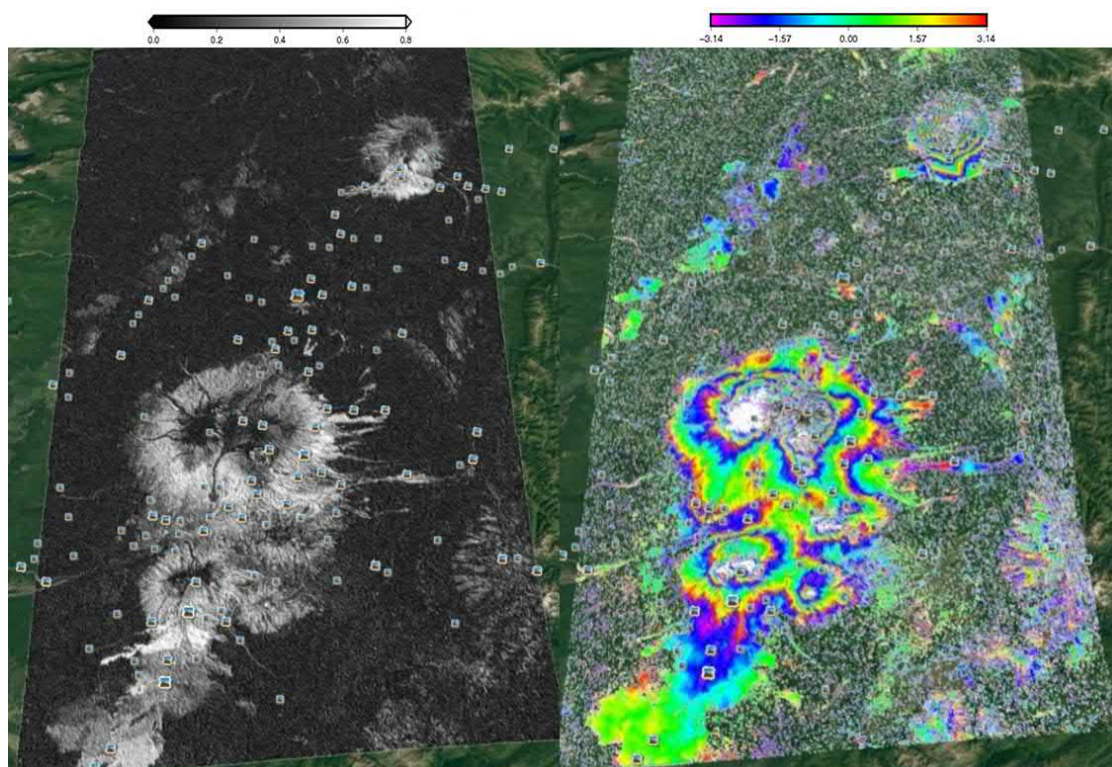


Рис. 9. Обработанные данные 07.01.2017- 07.25.2017– корреляция и фазовый портрет.

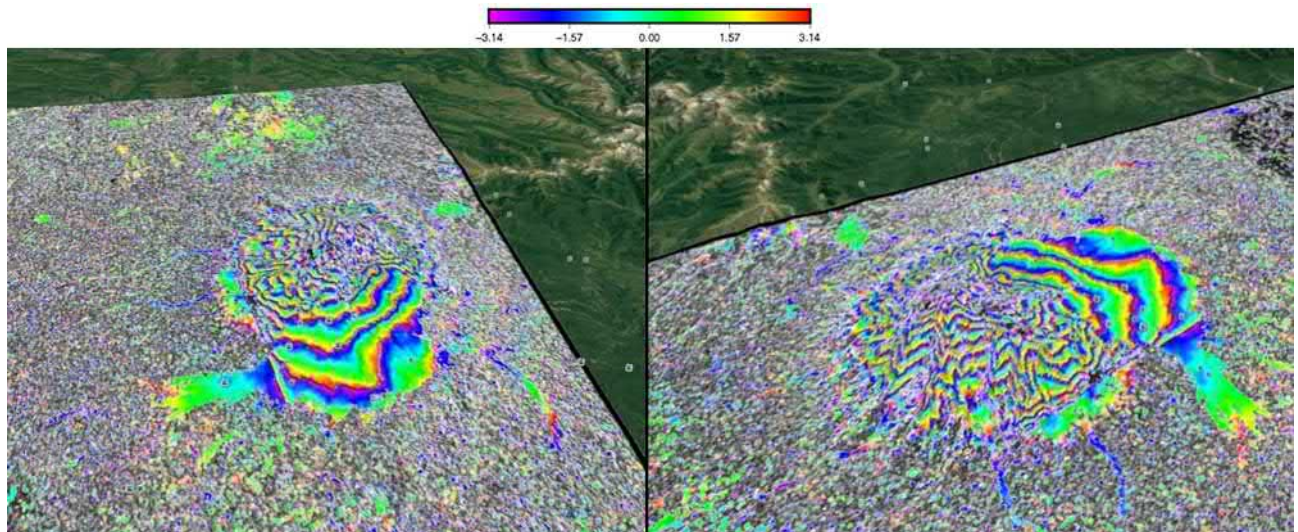
Вулкан Шивелуч во время активности:

Рис. 10. Данные за период 07.01.2017- 07.25.2017.

Вулкан Шивелуч в неактивное время:

Таблица 3

Дата съемки	Имя файла	Имя орбит	Сенсор
07.01.2017	S1A_IW_SLC__1SDV _20170905T070044 _20170905T070112_018237 _01EA8A_3B58	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20170925T121516_V20170904T225942_ 20170906T005942.EOF	Sentinel-1A
07.25.2017	S1A_IW_SLC__1SDV _20170812T070043 _20170812T070111_017887 _01DFEC_9D02	S1A_OPER_AUX_POEORB_OPOD _20170901T121527_V20170811T225942_ 20170813T005942.EOF	Sentinel-1A

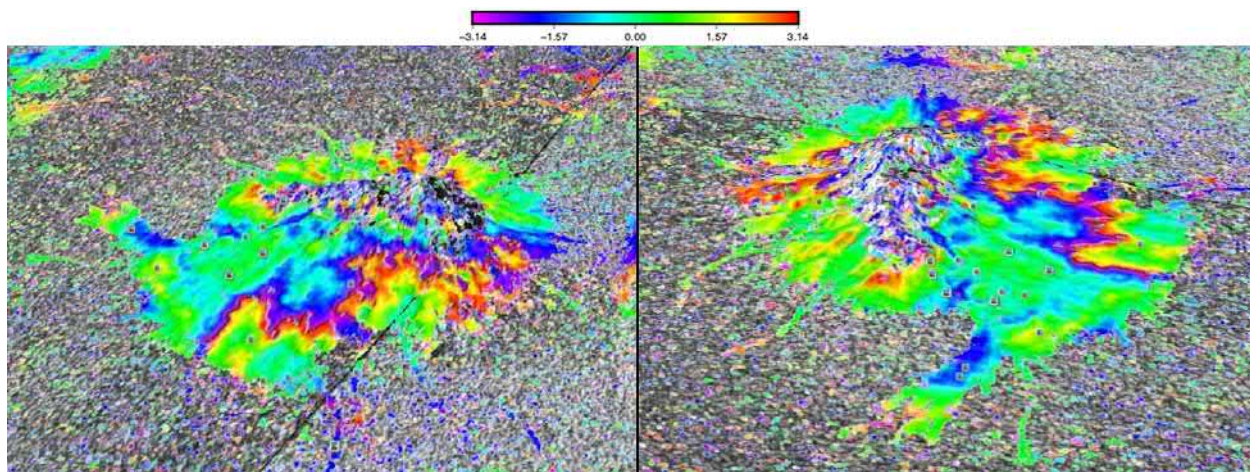


Рис. 11. Данные за период 08.12.2017 – 09.05.2017.

Координаты:

56.65 северной широты

161.36 восточной долготы

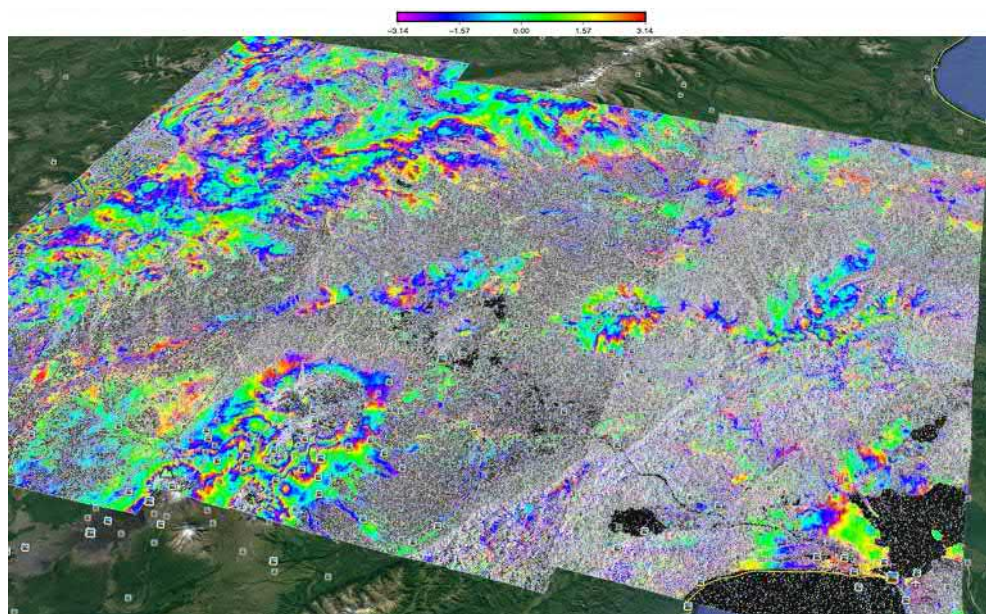


Рис. 12. Данные за период 08.12.2017 – 09.05.2017.

Заключение

Как видно в данной работе, в зимнее время очень плохая корреляция соответственно и фазовый портрет. Тогда как в летнее время корреляция и фазовый портрет дают достаточно четкое изображение поверхности. Это обусловлено тем, что в зимнее время снег мешает нормальной обработке данных, в летнее время плохая корреляция может происходить из-за густых лесов. Очень хорошая корреляция идет от высоких точек, это могут быть вулканы, хребты, сопки и т.д., причем в летнее и в зимнее время.

Список литературы

- [1] “<http://www.ifz.ru/v-otdelenie/lab-502/napravlenija-issledovanii/razrabotka-metodov-obrabotki-i-interpretacii-dannykh-radarnoi-sputnikovoi-interferometrii/o-metode>”.
- [2] “<https://innoter.com/satellites/1090>”.
- [3] “<http://topex.ucsd.edu/gmtsar>”.
- [4] “<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>”.
- [5] Lundgren P., Lu Z., “Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations”, *Geophysical Research Letters.*, **33** (2006).
- [6] Ji L. et al., “Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR.”, *Journal of Volcanology and Geothermal Research.*, 2013, № 256, 87-95.

Список литературы (ГОСТ)

- [1] <http://www.ifz.ru/v-otdelenie/lab-502/napravlenija-issledovanii/razrabotka-metodov-obrabotki-i-interpretacii-dannykh-radarnoi-sputnikovoi-interferometrii/o-metode>
- [2] <https://innoter.com/satellites/1090>
- [3] <http://topex.ucsd.edu/gmtsar>
- [4] <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar>
- [5] Lundgren P., Lu Z. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // *Geophysical Research Letters.* 2006. vol 33
- [6] Ji L. et al. Pre-eruption deformation caused by dike intrusion beneath Kizimen volcano, Kamchatka, Russia, observed by InSAR // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2013. no. 256. pp. 87-95

Для цитирования: Кашапов И. Г. Программные средства обработки данных радарной интерферометрии по территории Камчатки // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки.* 2018. № 2(22). С. 53-70. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-53-70

For citation: Kashapov I. G. Software of data processing radar interferometry on the territory of Kamchatka, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2018, **22**: 2, 53-70. DOI: 10.18454/2079-6641-2018-22-2-53-70

Поступила в редакцию / Original article submitted: 01.01.2018