

# Оценка деформации земной поверхности по данным спутниковой радиолокационной интерферометрии и GPS на примере Ближне-Алеутского землетрясения 17 июля 2017

Верхотуров А.Л.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> – Институт горного дела ДВО РАН, <sup>2</sup> – Хабаровский Федеральный исследовательский центр

E-mail: andrey@ccfebras.ru

## 1. Введение

Представлены результаты обработки радиолокационных данных С-диапазона Sentinel-1 и данных наблюдений GPS. При помощи метода InSAR построены парные интерферограммы территории островов с различными интервалами между повторными съемками. Проведен анализ и оценка деформации земной поверхности, вызванной землетрясением, произошедшего в Командорском сегменте островной дуги Алеутских островов 17 июля 2017 года.

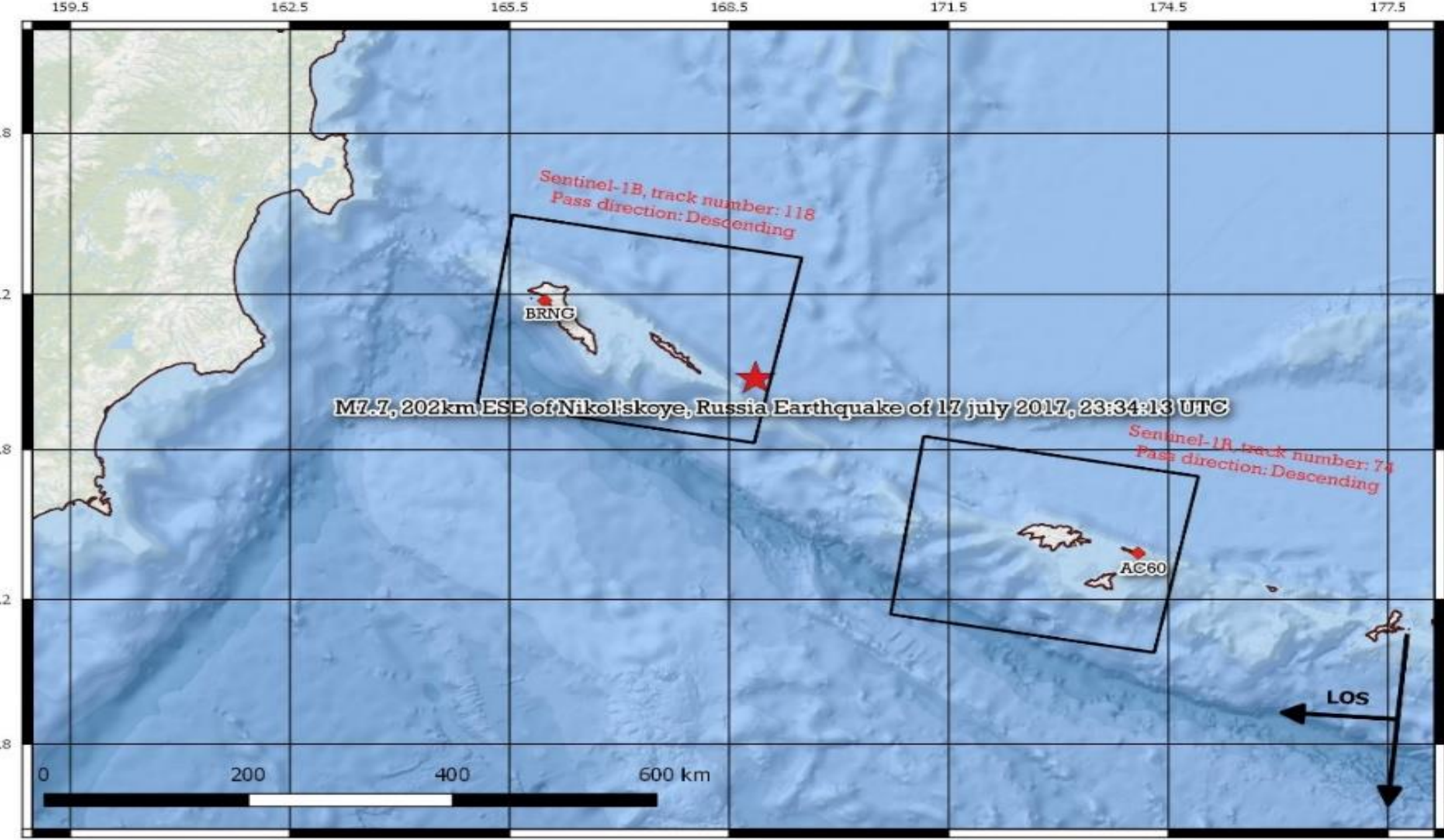


Рис. 1. Область исследования. Черными прямоугольниками обозначены сцены КА Sentinel-1. Красными ромбами обозначены станции GPS. Красная звезда - эпицентр землетрясения.

При исследовании таких событий возникают трудности в использовании технологии InSAR, которые заключаются в особенности операции восстановления (развертки) абсолютных значений фазы. Интерферограммы, которые содержат острова, могут включать в себя изолированные участки в окружении областей с низкой когерентностью, что ведет к сильной потере точности расчета смещений. Для того, чтобы восполнить пробел в данных InSAR такого события на Алеутских островах, а также учесть особенности развертки фазы, в данном исследовании была предложена схема интерферометрической обработки, которая позволяет получать приемлемые результаты расчетов.

**Цель настоящего исследования:** применение возможностей InSAR для оценки смещений и деформаций земной поверхности на примере землетрясения, произошедшего в Командорском сегменте островной дуги Алеутских островов 17 июля 2017 года в 23:34:13 UTC, по данным Sentinel-1 и ГНСС.

## 2. Методы

Базовые этапы интерферометрической обработки были выполнены с использованием программного обеспечения с открытым исходным кодом GMTSAR. Предложена модификация интерферометрической цепочки в виде сценария на Python, основанная главным образом на интерферометрических операторах GMTSAR и возможностей библиотеки GDAL в связке с Python.

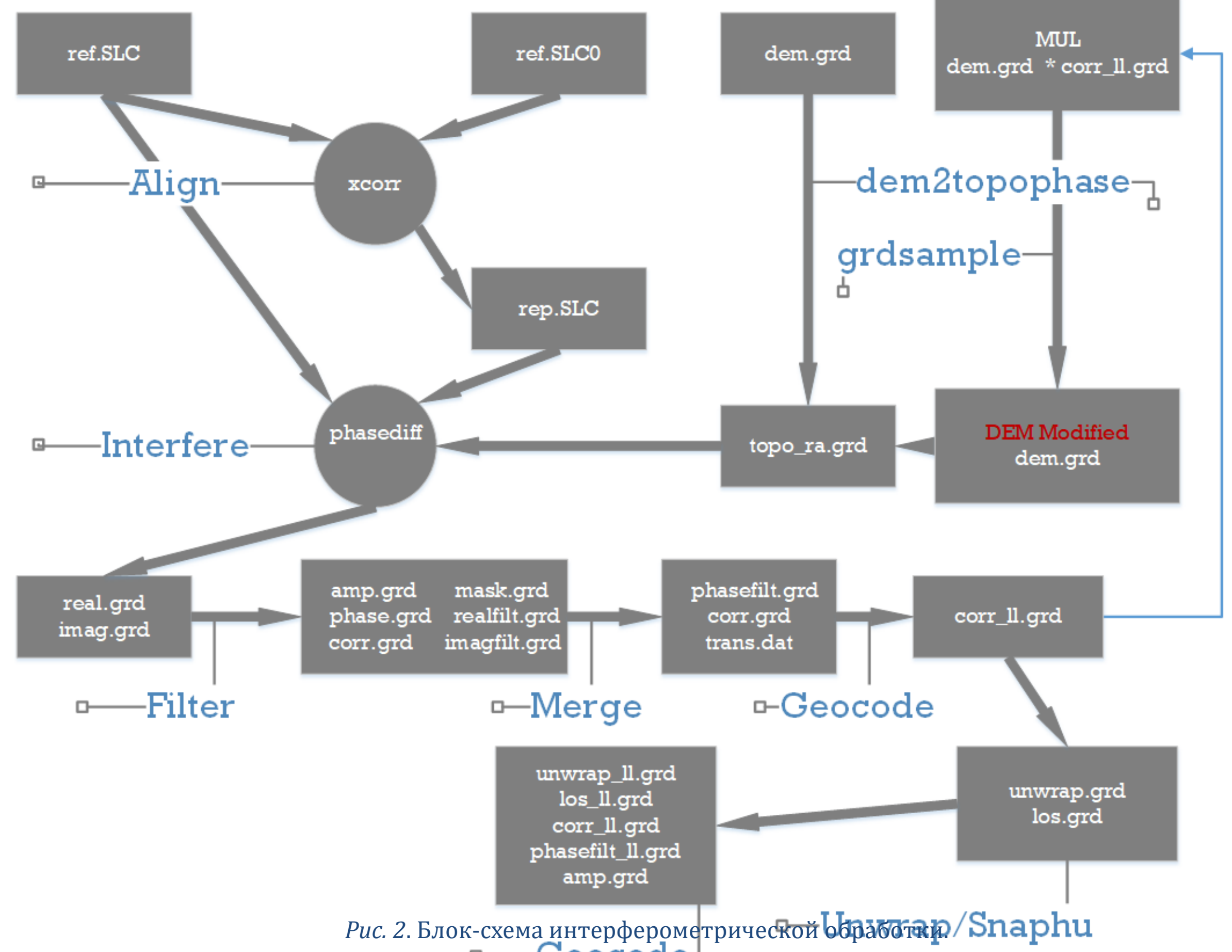


Рис. 2. Блок-схема интерферометрической обработки.

- В качестве входных данных для операторов *ref.SLC* и *ref.SLCO* используются радарные снимки Sentinel-1 уровня обработки Level-1 Single Look Complex (SLC), сделанных в той же геометрии съемки;
- При помощи оператора *xcorr* эти данные регистрируются;
- Формируется интерферограмма (оператор *phasdiff*);
- Производится фильтрация интерферограммы, расчет когерентности (этап *Filter*);
- Полученные данные геокодируются из радарных координат в географические (этап *Geocode*);
- Растровое изображение карты когерентности *corr\_ll.grd* конвертируется в координатную сетку растрового изображения рельефа SRTM. Затем, маскируются области с низкой когерентностью изображения рельефа SRTM (этап *grdsample*);
- Далее, повторяется процесс корегистрации, формирования интерферограммы, фильтрации, *unwrap*, *geocode*, где в качестве входного параметра теперь измененное растровое изображение SRTM *dem.grd*;

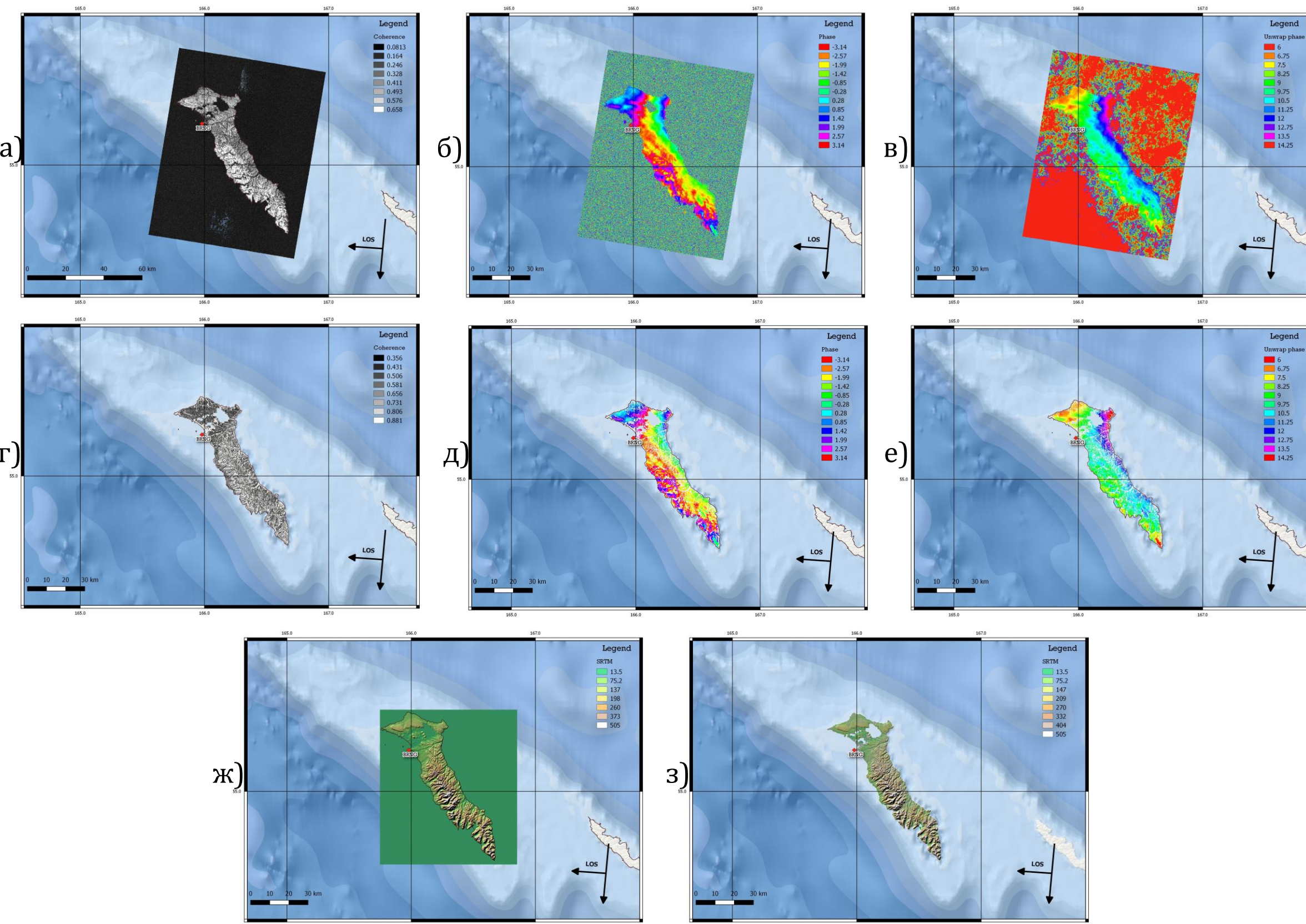


Рис. 3. Интерферометрическая обработка без коррекции рельефа SRTM (а, б, в). Интерферометрическая обработка с коррекцией рельефа SRTM (г, д, е). Рельеф SRTM (ж). Модифицированный рельеф SRTM (з).

На рис. 3 представлены примеры расчета когерентности, интерферометрической фазы и развернутой фазы с использованием рельефа SRTM (верхний ряд - а, б, в). Когерентность, фаза и развернутая фаза с использованием модифицированного рельефа SRTM по порогу когерентности (средний ряд - г, д, е). Рельеф SRTM (ж), модифицированный рельеф SRTM (з).

## 3. Результаты

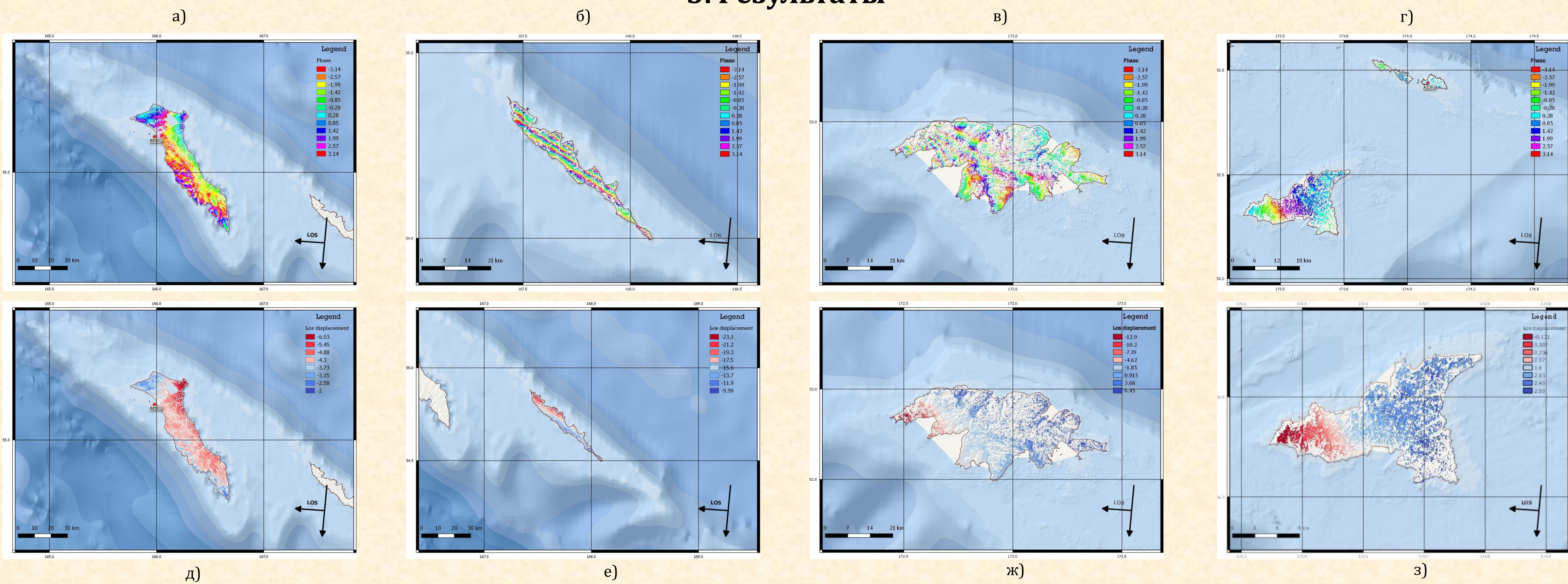


Рис. 4. Примеры интерферограмм и карта смещений территорий островов

При построении интерферограмм была использована цифровая модель рельефа SRTM пространственного разрешения 30 м для коррекции топографической фазы. Затем, в процессе развертки (*unwrap*) фазовых значений использовался алгоритм, реализованный в программном обеспечении *Snaphu* версии 2.0.1. со следующими параметрами:

- алгоритм, используемый для инициализации свернутых (*wrapped*) значений фазы – MST (Minimum Spanning Tree);
- порог интерферометрической когерентности – 0.35;
- развертка фазы в режиме тайлов (*tile mode*) – не использовался;

Стоит отметить, что именно при таких параметрических характеристиках в процессе развертки фазы были получены наиболее точные результаты. В табл. 1 и табл. 2 приводятся значения LOS за временной интервал между съемками и косейсмический скачок, зарегистрированный в канале Восток-Запад станциями *BRNG* и *AC60* (столбцы 6-й и 7-й соответственно), а также параметры съемки, где:  $V_p$  – перпендикулярная базовая линия (м);  $V_T$  – количество дней между съемками;  $C_{mean}$  – средние значения интерферометрической когерентности земной поверхности в кадре снимка;  $H_A$  – высота неоднозначности (м).

Таблица 1. Смещения земной поверхности по данным InSAR и GPS (станция BRNG).

Временной интервал	$V_p$ (м)	$V_T$ (день)	$C_{mean}$	$H_A$ (м)	Los, (мм)	GPS (East), мм
11Июль2017	3.63	12	0.43	4294	-37.5	-71.1
23Июль2017						
11Июль2017	15.35	24	0.33	1014	-55.46	-71.1
04Авг2017						
11Июль2017	130	36	0.29	119	-59.30	-71.1
16Авг2017						
11Июль2017	66	48	0.37	233	-17.64	-71.1
28Авг2017						
11Июль2017	13.24	60	0.28	1176	+40.66	-71.1
09Сен2017						
11Июль2017	35	72	0.26	434	+34.99	-71.1
21Сен2017						
05Июнь2017	111	72	0.20	140	-41.23	-71.1
16Авг2017						
29Июнь2017	112	36	0.33	138	+11.32	-71.1
04Авг2017						
29Июнь2017	99.92	24	0.30	155	-38.00	-71.1
23Июль2017						

Таблица 2. Смещения земной поверхности по данным InSAR и GPS (станция AC60).

Временной интервал	$V_p$ (м)	$V_T$ (день)	$C_{mean}$	$H_A$ (м)	Los, (мм)	GPS (East), мм
08Июль2017	23.59	12	0.29	660	+13.58	+15.0
20Июль2017						
08Июль2017	50.29	24	0.23	309.8	-3.58	+15.0
01Авг2017						
08Июль2017	105	36	0.23	147	-4.71	+15.0
13Авг2017						
08Июль2017	29.79	48	0.24	523	+5.58	+15.0
25Авг2017						
08Июль2017	33.76	60	0.22	461	+7.00	+15.0
06Сен2017						
02Июнь2017	82.99	60	0.22	187	+1.49	+15.0
01Авг2017						
14Июнь2017	39.50	36	0.26	394	+0.16	+15.0
20Июль2017						
26Июнь2017	22.21	24	0.28	701	+2.72	+15.0
20Июль2017						
14Июнь2017	44	60	0.22	351	+10.40	+15.0
13Авг2017						

Для каждого пикселя в радарных координатах, где расположена станция GPS, вычислялось среднее значение величины смещения  $3 \times 3$ -пиксельного окна.  $C_{mean}$  - среднее значение интерферометрической когерентности территорий островов: для табл. 1 - о. Беринга, для табл. 2 - о. Симия. В целом результаты достаточно хорошо согласуются между собой. Хотелось бы особо отметить первые пары снимков из 2-х таблиц. В табл. 1,  $H_A$  составляет 4294м.  $H_A$  говорит нам о том, что соседние fringes на интерферограмме, отличающиеся на  $2\pi$ , соответствуют участкам поверхности, высота которой изменилась на величину 4294м. Это означает, что чувствительность интерферометрической разности фаз к вариациям высот рельефа практически отсутствует. При этом чувствительность интерферометрической разности фаз к смещениям, наоборот - достаточно велика (из-за небольшой  $V_p = 3.63$ м). Тем не менее, значение Los -37.5мм не самый высокий показатель, что обусловлено высокой чувствительности к атмосферным воздействиям, которые не учитывались. В табл. 2 первая пара снимков показывает значения Los +13.58мм. Причина этого может быть в отсутствии облачности на снимках, а также, что за время между съемками (12 сут.) отражающие свойства радарного сигнала не успели измениться.

## 4. Выводы

Разработанная модификация схемы интерферометрической обработки была опробована на данных Sentinel-1 из архива Европейского космического агентства. Результаты хорошо согласуются с данными ГНСС, зарегистрировавшими косейсмический скачок станциями *BRNG* и *AC60*. Таким образом, в результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы и рекомендации для получения приемлемых результатов интерферометрической обработки:

- Интерферометрическую обработку рекомендуется проводить с модифицированным растровым изображением рельефа, в котором области с низкой когерентностью замаскированы значением NaN (значения 0 использовать нельзя, т.к. алгоритм не правильно их интерпретирует);
- Радиолокационные данные С-диапазона показывают достаточно высокую точность измерения;
- Вследствие низкой проникающей способности радиосигнала С-диапазона, временная база интерферометрических пар не должна превышать 70 суток. Преимущественно использовать данные, снятые в период с августа по октябрь;
- Интерферограммы с очень маленькими  $V_p$  (<30 м) иногда могут быть практически бесполезны из-за их высокой чувствительности к фазовому шуму и атмосферным воздействиям;
- Интерферограммы с  $V_p$  (>450 м) могут содержать в себе много «шума». Кроме того, когерентность, как правило, низкая из-за высокой геометрической и объемной декорреляции рассеяния радарного сигнала;
- Оптимальная  $V_p$  составляет 0.2 - 0.8 от предельного значения, диапазон которой для Sentinel-1 находится в пределах 167 - 668 м;
- При значении  $V_p$  менее 100 м интерферометрическая пара считается более пригодной для исследования динамики земной поверхности.

## 5. Обсуждение

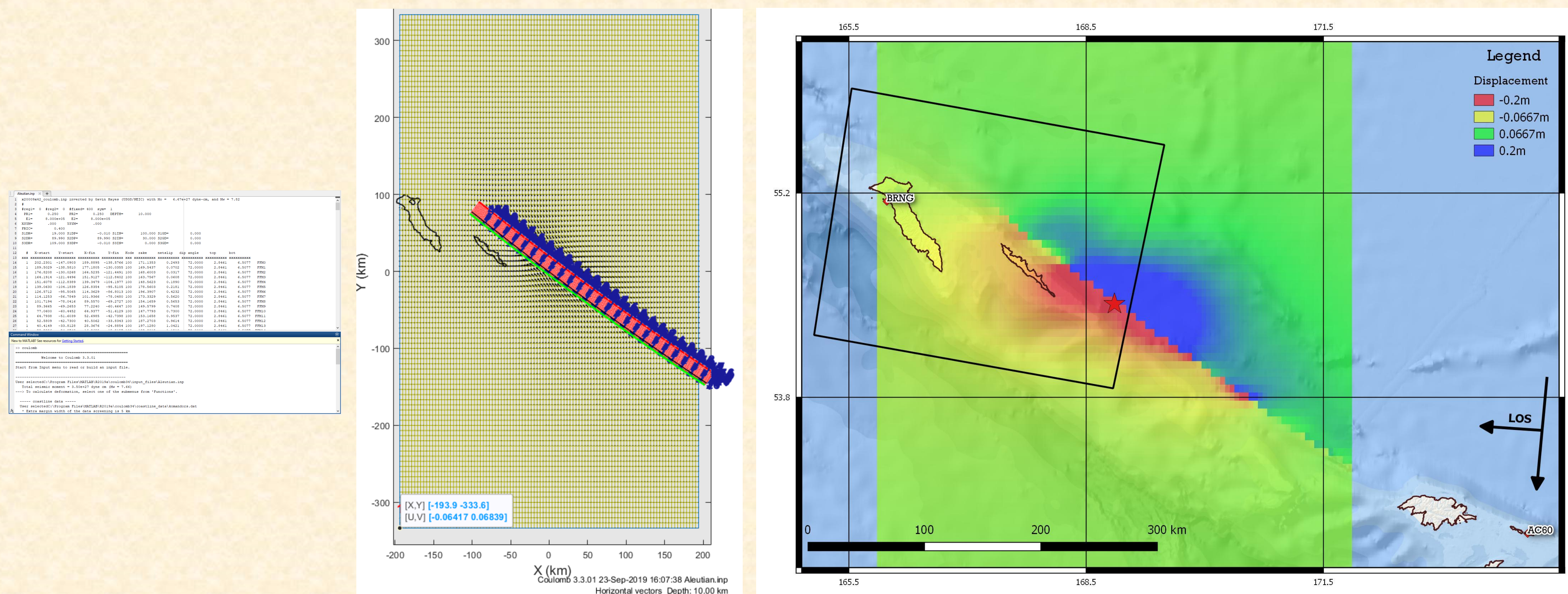


Рис. 5. Реализация Finite Fault Model Maps в программном обеспечении Coulomb 3.3

По данным Геологической службы США была реализована *Finite Fault Model Maps*, по ней определено поле смещений программным комплексом *Coulomb 3.3* для Matlab'a. Смещения по координатной сетке были преобразованы в географические координаты при помощи GDAL библиотеки в связке с Python (рис. 4). Модельные данные USGS не плохо согласуются с результатами спутниковой радиолокационной интерферометрии на территории островов Медный (смещения порядка 18 см) и Беринга (смещения порядка 3 см). Однако, деформации, которые зафиксированы на острове Атту, о чем свидетельствует фаза интерферограммы (рис. 4в), плохо согласуются с модельными данными USGS, что может послужить причиной будущих исследований.

При выполнении расчетов были использованы вычислительные ресурсы ЦКП «Центр данных ДВО РАН».