

# НОВАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА БЛИЖНЕ-АЛЕУТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 17.07.2017 Г. НА ОСНОВЕ ДАННЫХ РСА-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

В.О. Михайлов<sup>1,2</sup>, В.А. Тимофеева<sup>1,3\*</sup>, В.Б. Смирнов<sup>2,1</sup>, Е.П. Тимошкина<sup>1</sup>, Н.М. Шапиро<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, физический факультет, г. Москва, Россия

<sup>3</sup> Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup> Институт наук о Земле, Университет Гренобль-Альпы, г. Гренобль, Франция

\* E-mail: v.a.timofeeva@iperas.ru

СЕКЦИЯ G:  
Дистанционные методы  
в геологии и геофизике

Деятнадцатая международная конференция  
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса», 15-19 ноября 2021

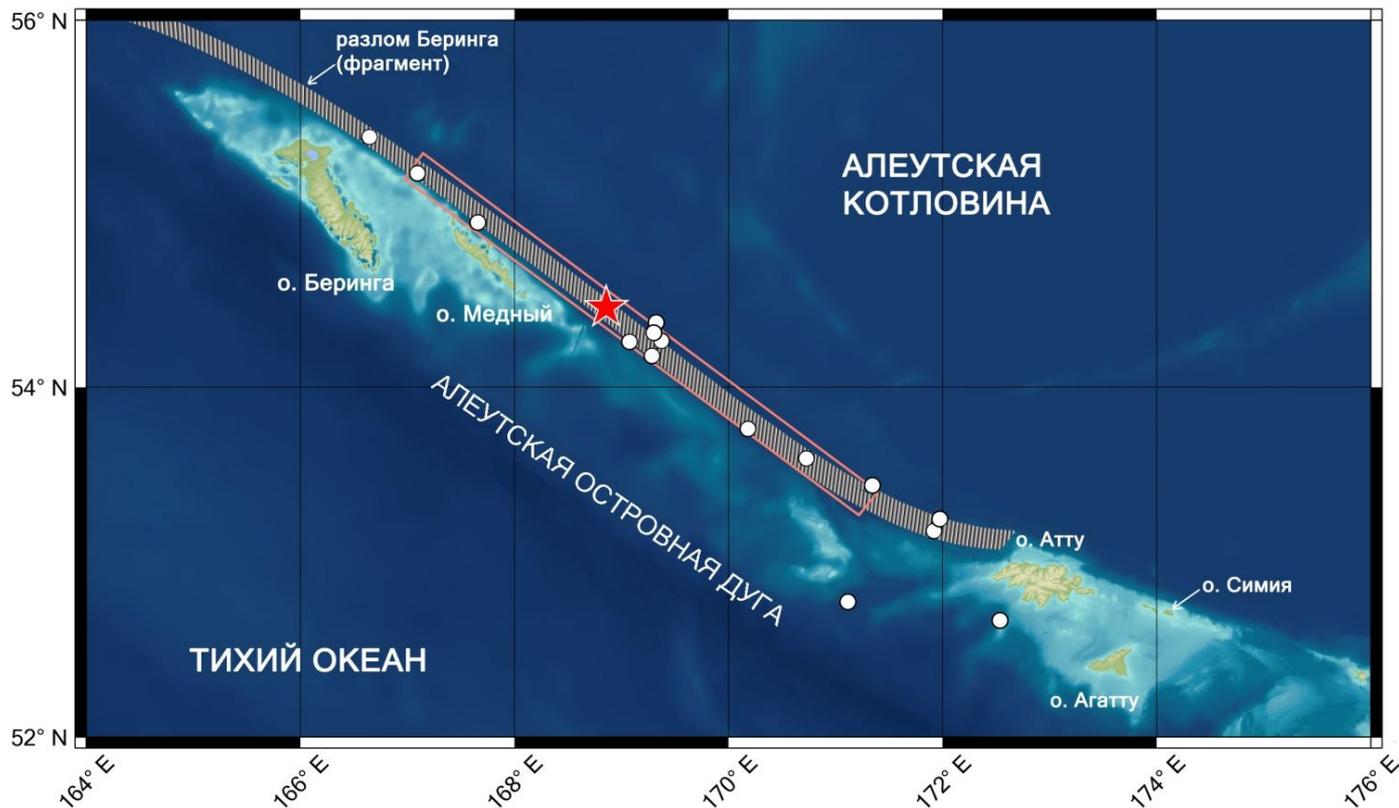
# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## Краткая информация

Ближне-Алеутское землетрясение (БАЗ) произошло 17.07.2017 в 23:34 UTC (18.07.2017 в 11:34 по местному времени),  $M_W = 7.6$ .

Эпицентр землетрясения находился к юго-востоку от о. Медный, у подножья склона шельфа в 200 км от пос. Никольское (о. Беринга), и имел координаты  $54.443^\circ$  с.ш. и  $168.857^\circ$  в.д.



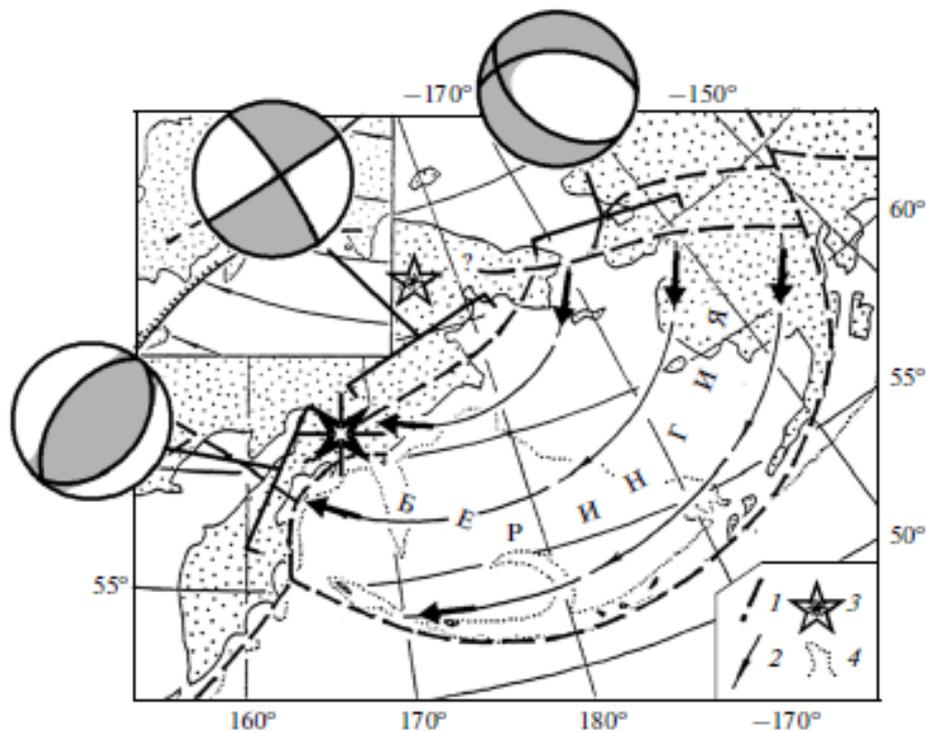
Область Ближне-Алеутского землетрясения. Розовый прямоугольник – модель поверхности разрыва O1 из работы [Чебров и др., 2019\*]. Красная звезда – эпицентр главного события, белые круги – афтершоки с магнитудой более 5 по данным Геологической службы США (USGS).

\* Чебров Д.В., Кугаенко Ю.А., Ландер А.В., Абубакиров И.Р., Гусев А.А., Дрознина С.Я., Митюшкина С.В., Ототюк Д.А., Павлов В.М., Титков Н.Н. Ближне-Алеутское землетрясение 17.07.2017 г. с  $M_w = 7.8$ . I. Протяженный разрыв вдоль Командорского блока Алеутской островной дуги по данным наблюдений на Камчатке // Физика Земли. 2019. № 4. С. 48-71.

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## Особенность области землетрясения



(рис. из статьи Гордеев и др., 2015)

Землетрясение произошло в зоне сочленения трех плит: Тихоокеанской, Охотоморской и Берингии.

Важно, что микроплита Берингия выделена по геологическим и сейсмологическим данным\*, но гипотеза о ее существовании до сих пор является дискуссионной.

Предположительно она занимает всю акваторию Берингова моря и некоторые прибрежные районы.

**Исследование механизмов очагов землетрясений на периферии плиты Берингия, в том числе методами спутниковой радарной интерферометрии, важно для проверки гипотезы о существовании этой микроплиты.**

\* Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дроздин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология. – 1994. –

Вып. 26. – С. 103–122.

Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V., Kovalev V.N., Imaev V.S., Kozmin B.M., Imaeva L.P. Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block // Geology. – 1997. – Vol. 25. – № 11. – Pp. 979–982.

Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. – 2015. – № 4. – С. 58–67.

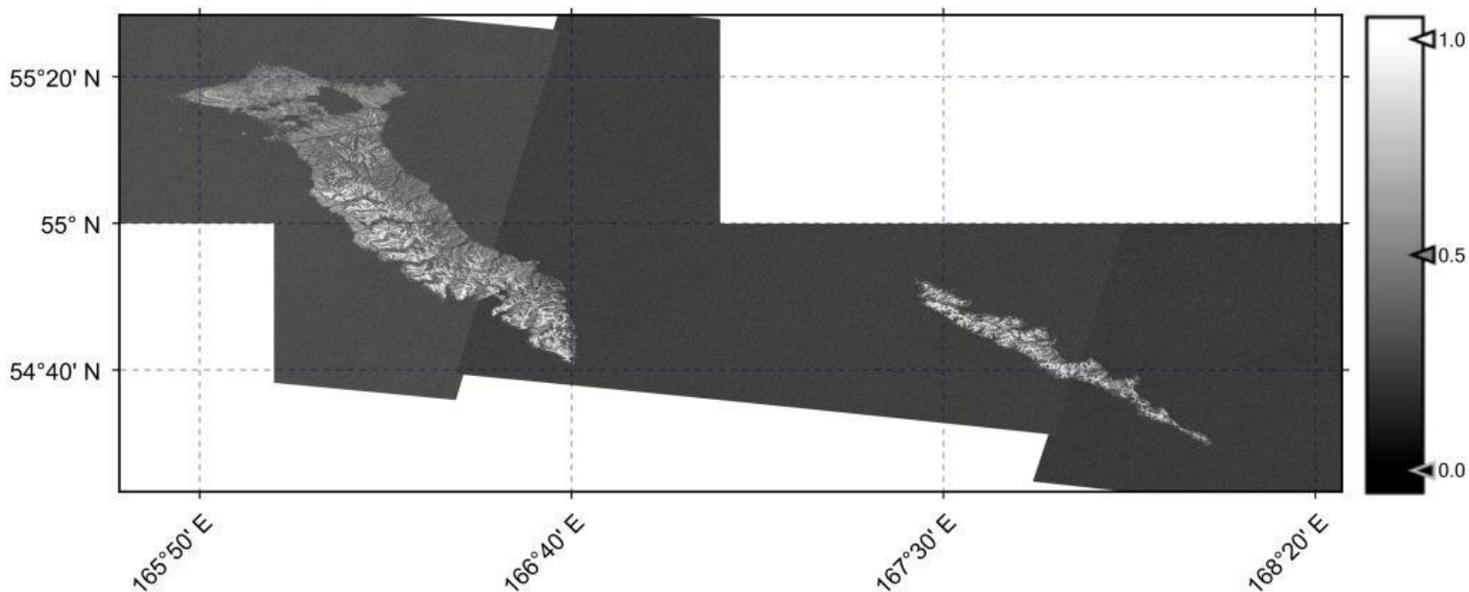
# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## РСА-интерферометрия: оценка полей смещений земной поверхности

Обработка снимков производилась методом дифференциальной интерферометрии (DInSAR) с использованием программного пакета SNAP с встроенным плагином SNAPHU, реализующим алгоритм развертывания фазы. Дифференциальные интерферограммы всех пар снимков показали высокую когерентность (более 0.7) на островах Беринга и Медный.

Период съемки охватывал во времени само событие, его ближайший форшок ( $M_w=6.3$ ) и основные афтершоки (18.07.2017 с  $M_w=5.2$  и 28.07.2017 с  $M_w=5.6$ ).



Снимки 2017 г.
17.06.2017
29.06.2017
<b>11.07.2017</b>
<b>23.07.2017</b>
04.08.2017
16.08.2017
28.08.2017

- Sentinel-1B
- 118 трэк
- Нисходящая орбита
- Длина волны – 5.6 см

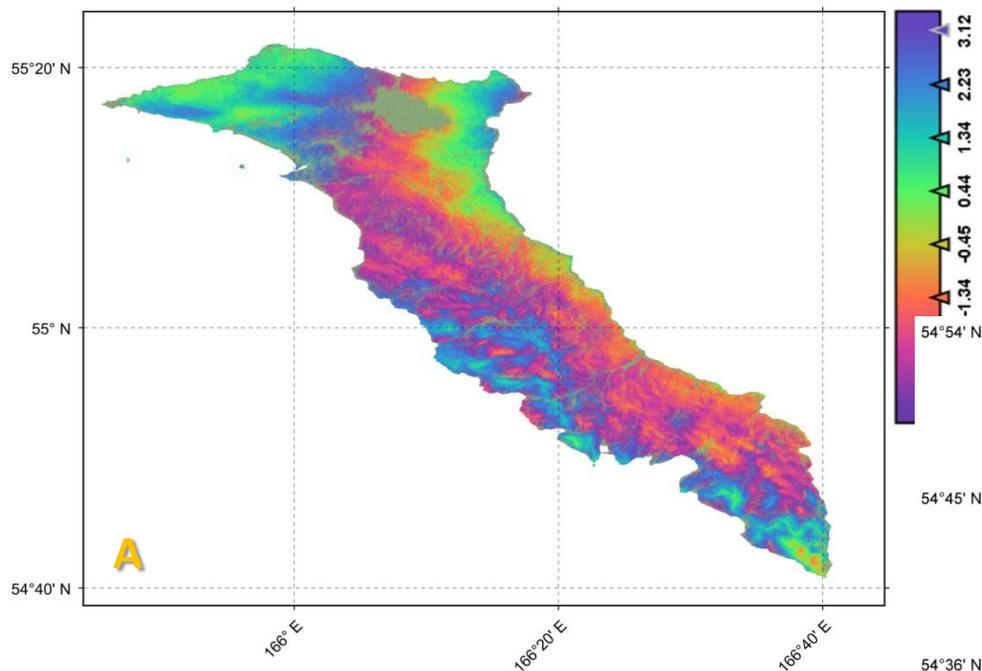
Карта когерентности (по снимкам 11.07.2017 – 23.07.2017)

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## РСА-интерферометрия: оценка полей смещений земной поверхности

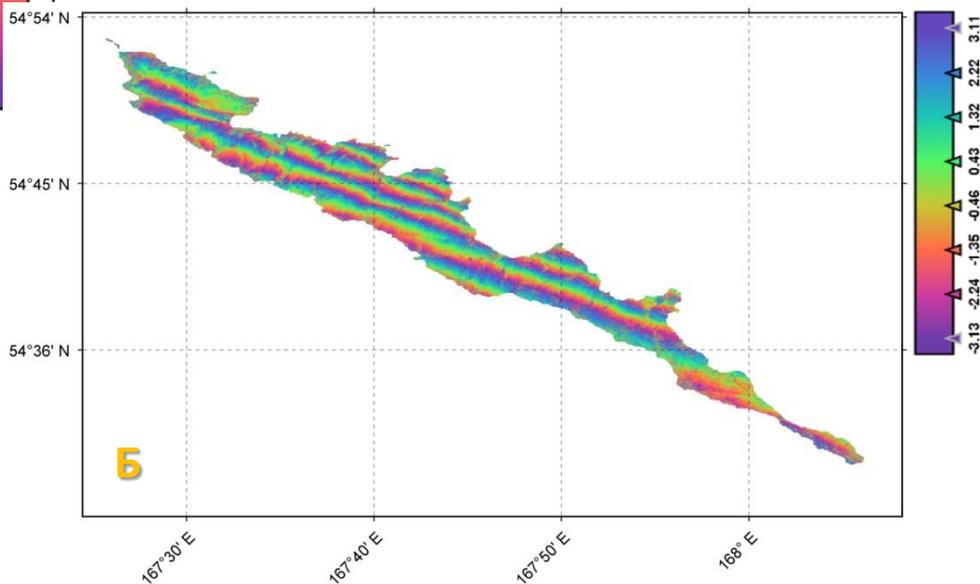
Интерферограмма пары снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 (пространственная базовая линия 3.63 м) выявила наиболее четкие смещения в направлении на спутник.



Смещения характеризуют косейсмические и постсейсмические события, произошедшие за 6 дней после БАЗ.

Интерферограммы (неразвернутая фаза), полученная по паре снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017. Интервал изменения от  $-\pi$  до  $\pi$ .

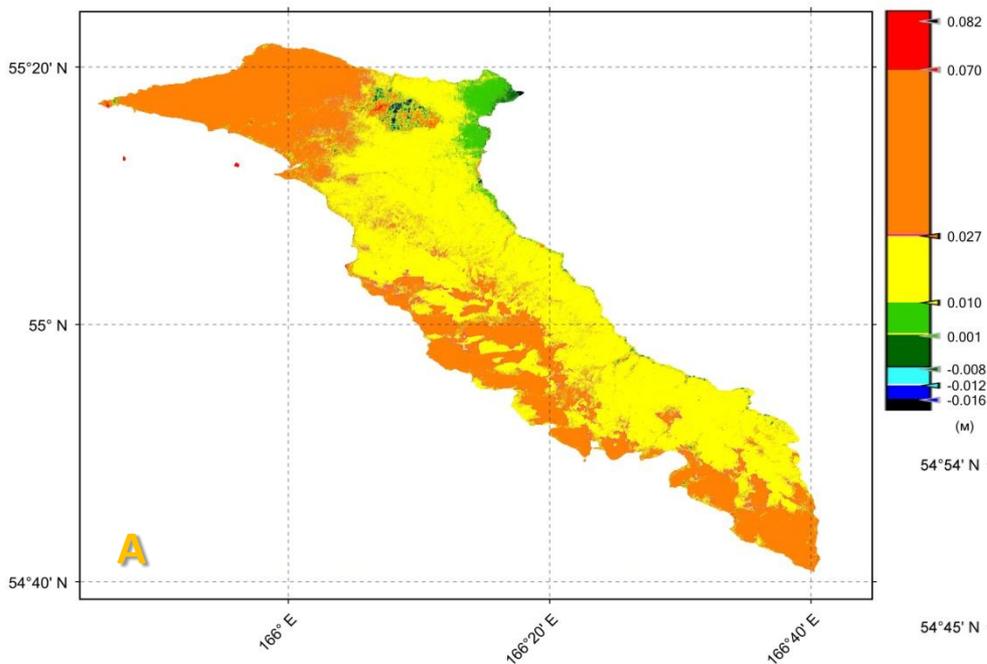
**А** – о. Беринга, **Б** – о. Медный.



# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

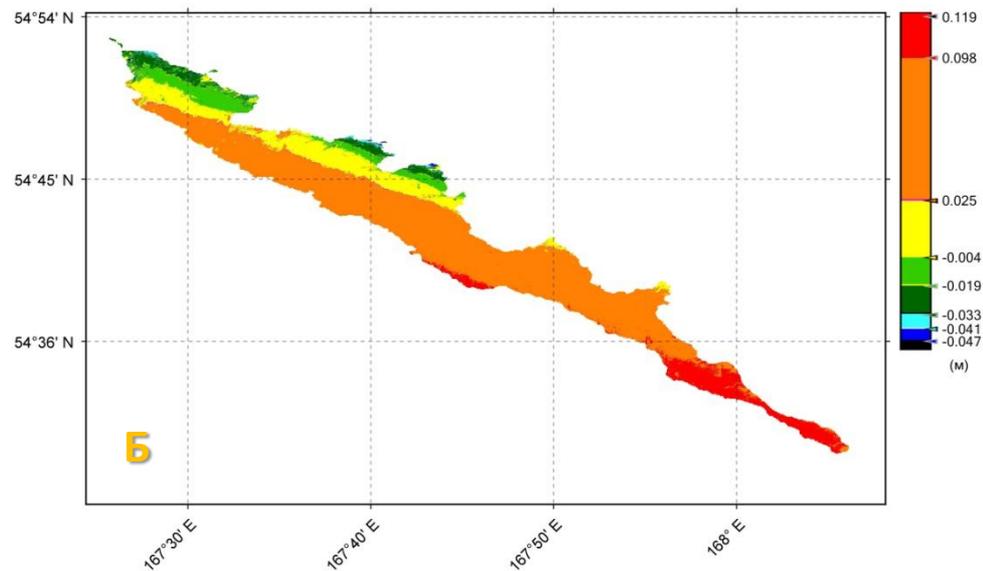
## РСА-интерферометрия: оценка полей смещений земной поверхности



Поля смещений (развернутая фаза), полученные по паре снимков от 11.07.2017 и 23.07.2017 в долях метра.

А – о. Беринга, Б – о. Медный.

(Поля смещений приведены к нулевому среднему)

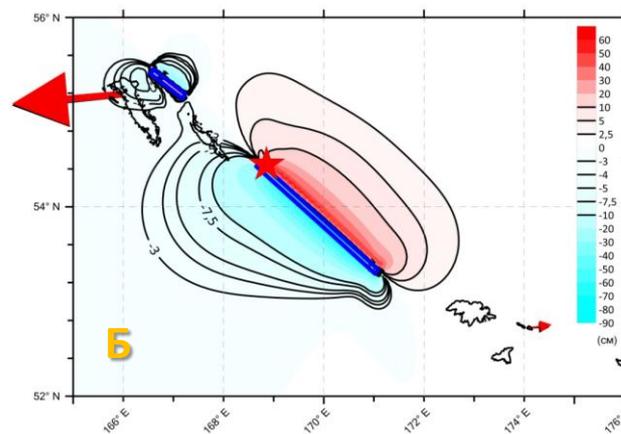
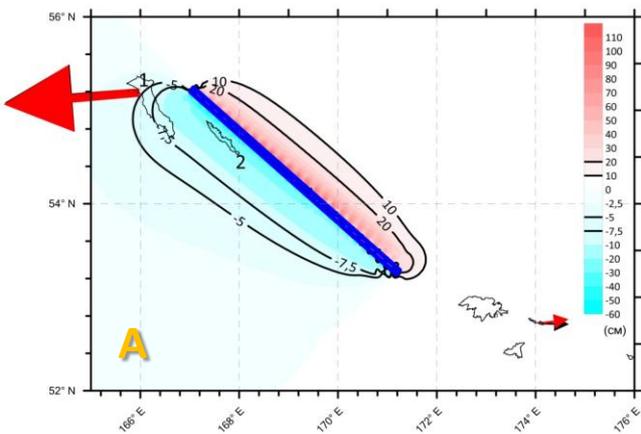


Смещения характеризуют  
косейсмические и постсейсмические события,  
произошедшие за 6 дней после БАЗ.

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

**Численная проверка согласованности данных РСА-интерферометрии и спутниковой геодезии, а также гипотезы о том, что сейсмический очаг состоял из двух разрозненных разрывов:**



Смещения в направлении на спутник в районе БАЗ, рассчитанные с использованием геометрии моделей, предложенных в работе [Чебров и др., 2019]:

**А** - модель О1, единый очаг;

**Б** - очаг, состоящий из двух элементов.

Цифры 1 и 2 на рис А обозначают острова Беринга и Медный.

В модели единого очага изолинии смещений в направлении на спутник на острове Медный вытянуты вдоль длинной оси острова, а на о. Беринга пересекают его с юго-запада на северо-восток, при этом смещения увеличиваются с юго-востока на северо-запад. Это соответствует данным РСА-интерферометрии (см. предыдущий слайд).

В модели составного очага изолинии смещений на о. Медный пересекают его с запада на восток, на о. Беринга смещения увеличиваются в юго-восточном направлении. Это противоречит данным РСА-интерферометрии, показанным на предыдущем слайде.

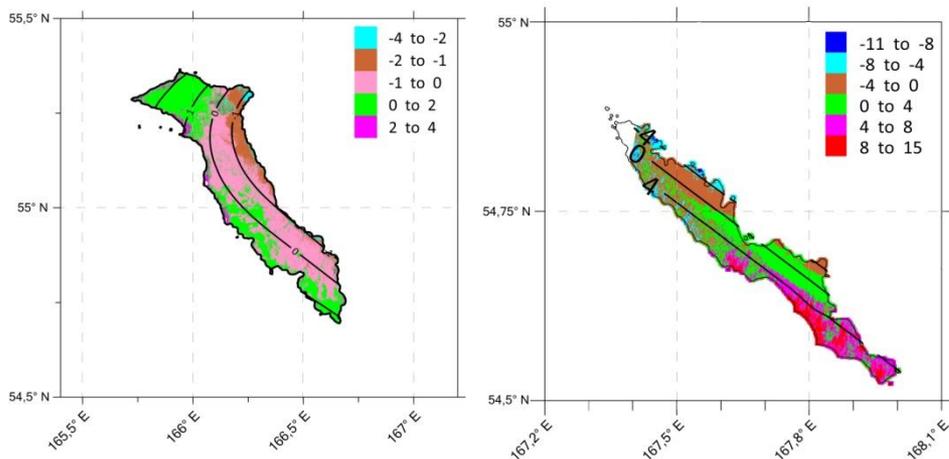
**Отсюда заключаем, что если очаг и имеет области с меньшими смещениями, то определенно не на отрезке, ближнем к о. Медный. В модели единого очага, данные РСА-интерферометрии и GPS согласуются.**

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

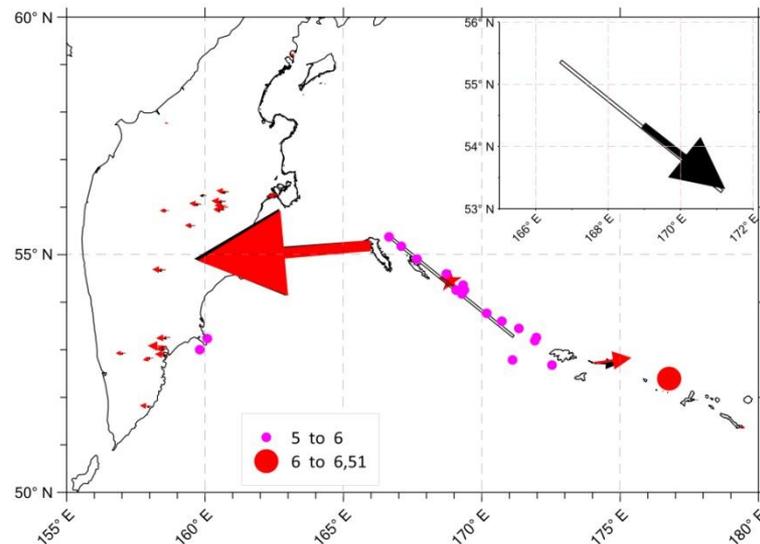
## Решение обратной задачи

Поля смещений в очаговой области землетрясения БАЗ для модели, состоящей из единого разрыва длиной по простиранию 370 км, по падению 18 км.



Смещения (в см) в направлении на спутник на о. Беринга (слева) и о. Медный (справа). Цветовая шкала – РСА-данные, изолинии – полученное решение.

Смещения по падению и простиранию составили 0.52 м и -1.78 м соответственно, т.е. это в основном правый сдвиг, с углом подвижки  $163.4^\circ$  и относительно небольшой надвиговой компонентой. В целом, данные о смещениях на пунктах GPS и на отражающих площадках по РСА-интерферометрии согласуются хорошо. Максимальные расхождения в смещениях на север и восток составляют 0.44 и 0.63 см. Сейсмический момент, при задании модуля сдвига для земной коры 32 ГПа, составляет  $3.95 \times 10^{20}$  Н·м, что меньше значений  $5.2 - 5.4 \times 10^{20}$  Н·м, опубликованных на сайтах Геологической службы США [USGS] и проекта Global Centroid-Moment-Tensor [GCMT].



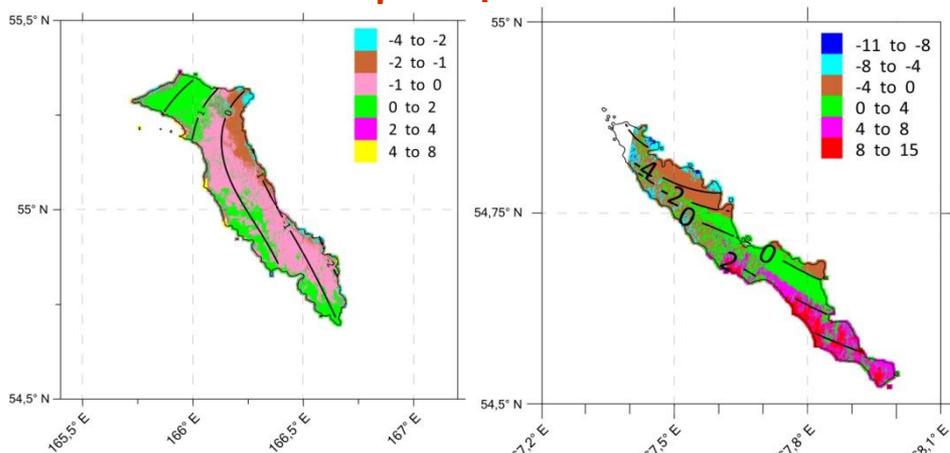
Сравнение смещений на пунктах GPS (красные стрелки – расчетные, черные – измеренные). Пурпурные точки – основные афтершоки по данным сайта USGS, красная звезда – эпицентр землетрясения. Максимальный размер стрелки соответствует смещению в 7.19 см (о. Беринга).

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

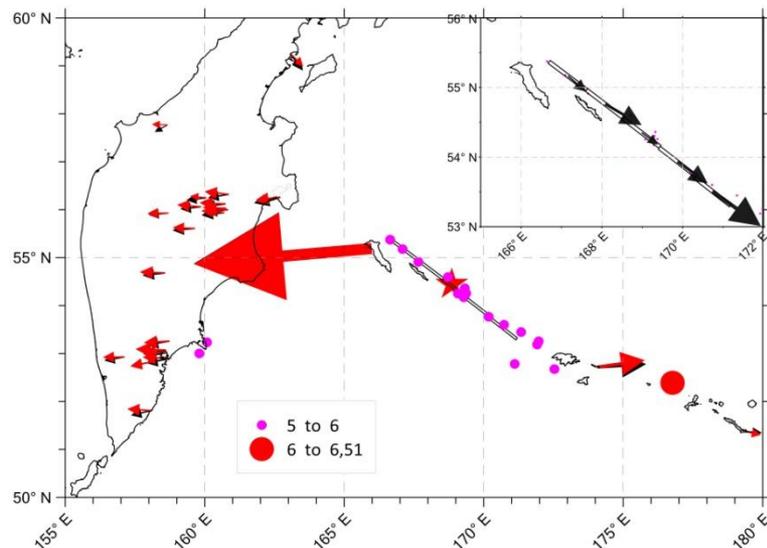
В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## Решение обратной задачи

Поля смещений в очаговой области землетрясения БАЗ для модели, состоящей из прямоугольного разрыва длиной по простиранию 370 км и разделенного на пять равных элементов по простиранию.



Смещения (в см) в направлении на спутник на о. Беринга (слева) и о. Медный (справа). Цветовая шкала – РСА-данные, изолинии – полученное решение.



Сравнение смещений на пунктах GPS (красные стрелки – расчетные, черные – измеренные). На врезке в правом верхнем углу показаны смещения на пяти элементах модели.

Для исследования изменений поля смещения вдоль поверхности разрыва модель была разделена на пять равных элементов по простиранию. Абсолютные значения вектора смещений составили (с Ю-В на С-З) 4.23 м, 2.64 м, 1.43 м, 2.99 м и 1.72 м, также с надвиговой компонентой (врезка на рис. справа). Смещения распределены неравномерно, наибольшие смещения получены на Ю-В участке. В районе о. Беринга и Медный смещения в среднем меньше, чем на южном участке разлома Беринга. Это согласуется с моделью [Lay et al., 2017\*].

Отметим, что наименьшие смещения получены на среднем элементе, где располагалась большая часть афтершоков (события с магнитудой больше 5 показаны пурпурными точками).

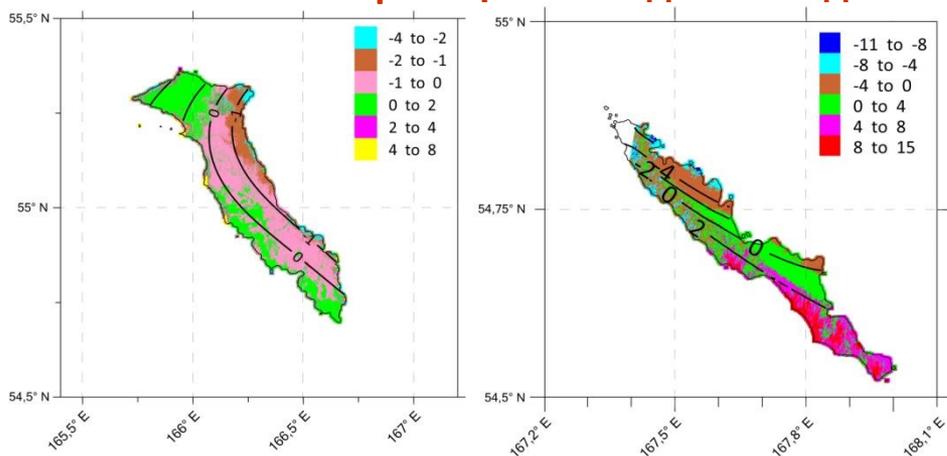
\* Lay T., Ye L., Bai Y., Cheung K.F., Kanamori H., Freymueller J., Steblow G.M., Kogan, M.G. Rupture Along 400 km of the Bering Fracture Zone in the Komandorsky Islands Earthquake (Mw 7.8) of 17 July 2017 // Geophysical Research Letters. 2017. Vol. 44. Issue 24. P. 12,161–12,169.

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

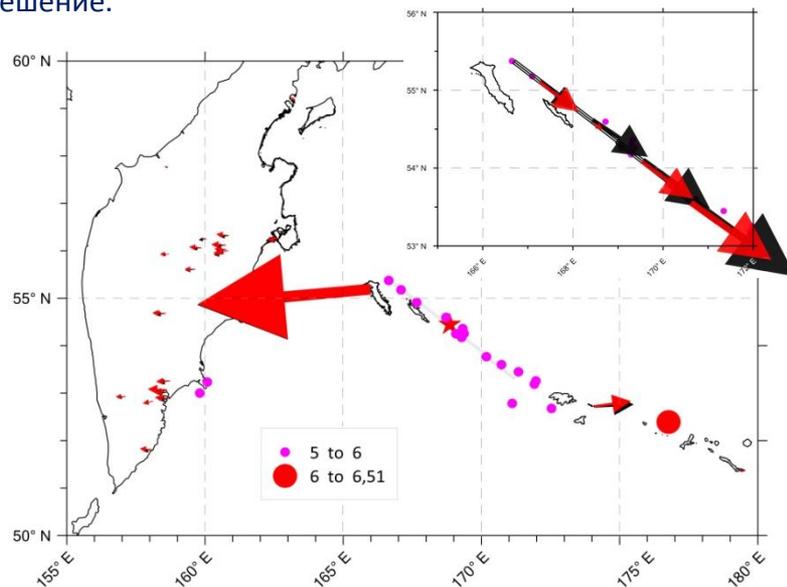
В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## Решение обратной задачи

Поля смещений в очаговой области землетрясения БАЗ для модели, состоящей из прямоугольного разрыва длиной по простиранию 370 км, разделенного на четыре равных элемента по простиранию и два по падению.



Смещения (в см) в направлении на спутник на о. Беринга (слева) и о. Медный (справа). Цветовая шкала – РСА-данные, изолинии – полученное решение.



Сравнение смещений на пунктах GPS (красные стрелки – расчетные, черные – измеренные). Модель поверхности разрыва (врезка): красные стрелки – смещения на глубоких элементах, черные – на более мелких.

Для исследования вопроса о распределении смещения с глубиной, прямоугольная область, аппроксимирующая поверхность разрыва, была разделена на 8 элементов: четыре по простиранию и два по падению. Абсолютные значения вектора смещений составили (с Ю-В на С-З) на верхних (ближе к поверхности) элементах: 4.64 м, 2.99 м, 2.41 м и 1.59 м с меньшей надвиговой компонентой, чем в варианте с пятью элементами. В нижнем, более глубоком ряду смещения составили: 3.59 м, 2.29 м, 0.51 м и 1.78 м. Как и в предыдущем варианте, смещения распределены неравномерно, наибольшие смещения получены на Ю-В участке. Смещения в нижнем ряду систематически меньше смещений у поверхности.

# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

## Некоторые выводы

1. При сопоставлении моделей очагов землетрясений, построенных по сейсмологическим данным, с моделями по данным наземной и спутниковой геодезии, следует иметь в виду различие временных интервалов движений в очаговой области землетрясения. Сейсмологические данные и, соответственно, сейсмологические модели, отражают только процесс вспарывания, занимающий десятки секунд. Интервал накопления деформаций по спутниковой радарной интерферометрии может составлять несколько суток. Тем самым, движения в очаговой зоне, моделируемые по деформационным данным, включают в себя как полную подвижку при вспарывании очага землетрясения, так и часть постсейсмических смещений, которые могут быть связаны с различными криповыми процессами. Возможно, вклад могут вносить и подвижки в очагах сильных афтершоков.
2. В случае БАЗ двухсегментная модель очага построена на основе двухсегментной структуры облака афтершоков в первые часы после главного события [Чебров и др., 2019]. К исходу первых суток разделенные в пространстве в первые часы облака афтершоков слились, демонстрируя единую очаговую область. Вероятно, именно ее обнаруживает наша РСА-модель, отражающая суммарную за 6 суток деформацию.

## Подробнее об исследовании в одном из ближайших выпусков журнала «Физика Земли»:

В.О. Михайлов, В.А. Тимофеева, В.Б. Смирнов, Е.П. Тимошкина, Н.М. Шапиро

НОВАЯ МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА БЛИЖНЕ-АЛЕУТСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 17.07.2017 г. Mw=7.8  
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

о. Беринга



о. Медный, Южный мыс



© Евгений Мамаев. фото с сайта komandorsky.ru

*Исследование выполнено по госзаданию ИФЗ РАН, а также при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки № 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ» и Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова «Фундаментальные и прикладные исследования космоса».*