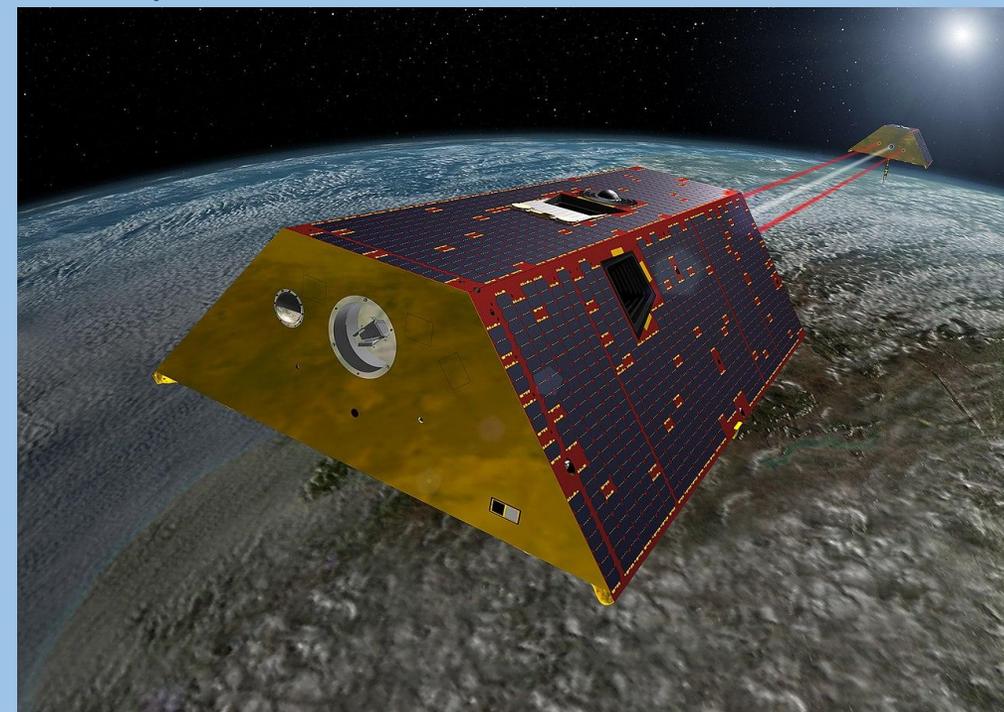


# Новые данные о вулканических и сейсмических процессах, полученные методами спутниковой геодезии и гравиметрии



Сентинель-1



GRACE-FO

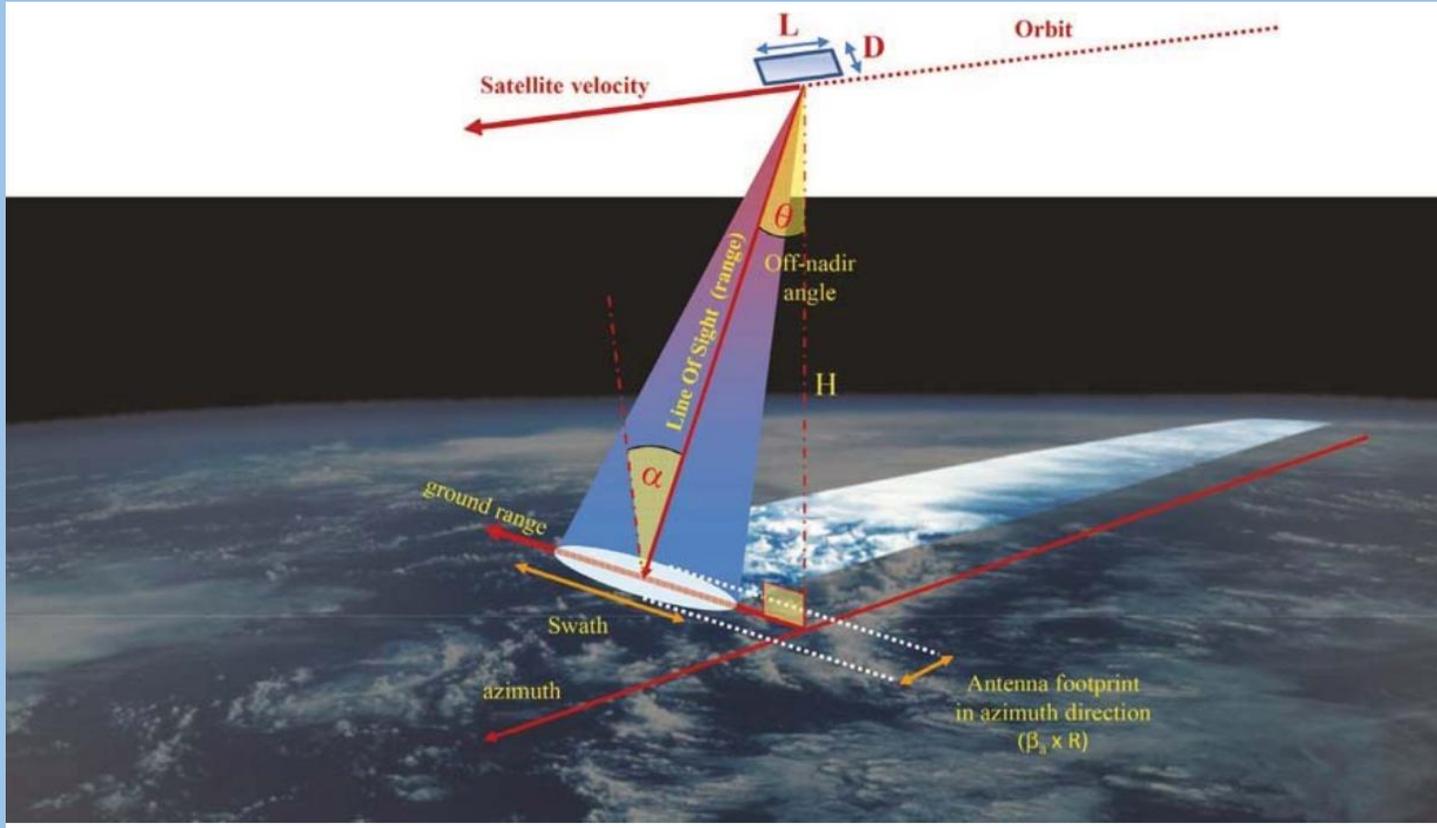
Валентин Олегович Михайлов

Лаборатория 502 «Комплексной геодинимической интерпретации наземных и спутниковых данных»

Лаборатория 107 «Лаборатория комплексного изучения и мониторинга геодинимических процессов в Курило-Камчатской зоне субдукции»

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН

# Оценка смещений земной поверхности по снимкам спутниковых радаров с синтезированной апертурой



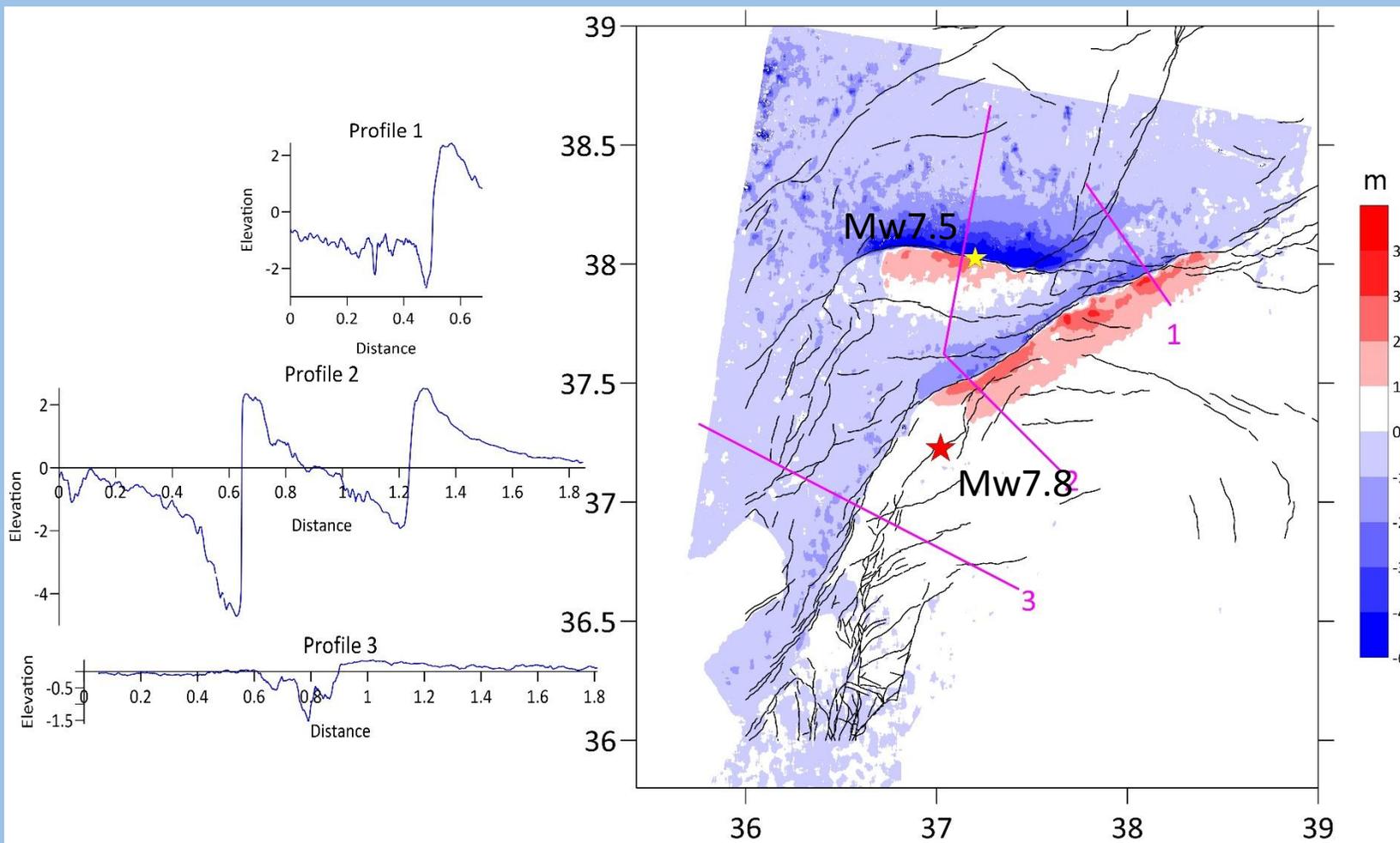
Спутниковая радарная интерферометрия является эффективным методом определения смещений земной поверхности с точностью порядка 1 см. Съёмка не зависит от времени суток, освещенности, погодных условий.

Снимки спутника ЕКА Sentinel-1А:

- С-диапазон, 5.6 см;
- интервал съёмки 12 дней;
- область покрытия снимков составляет до 200x250 км.

В отличие от пассивных приборов дистанционного зондирования, SAR является радиолокатором бокового обзора с синтезированной апертурой и обеспечивает активное дистанционное зондирование поверхности Земли. Съёмка ведется наклонным лучом, как правило направо от направления полета. Измеряются смещения отражающего объекта в направлении на спутник.

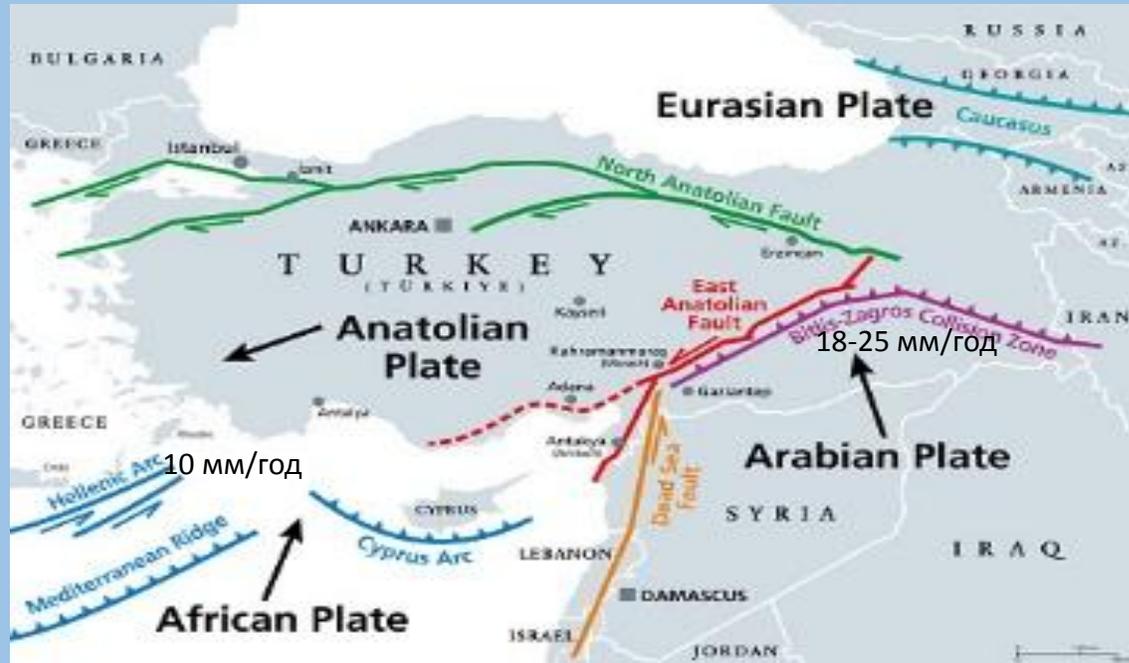
# Поле смещений земной поверхности (метры) в направлении запад – восток в области катастрофических землетрясений в Турции 06.02.2023 по снимкам спутника Сентинель-1 от 29.01.2023 и 10.02.2023



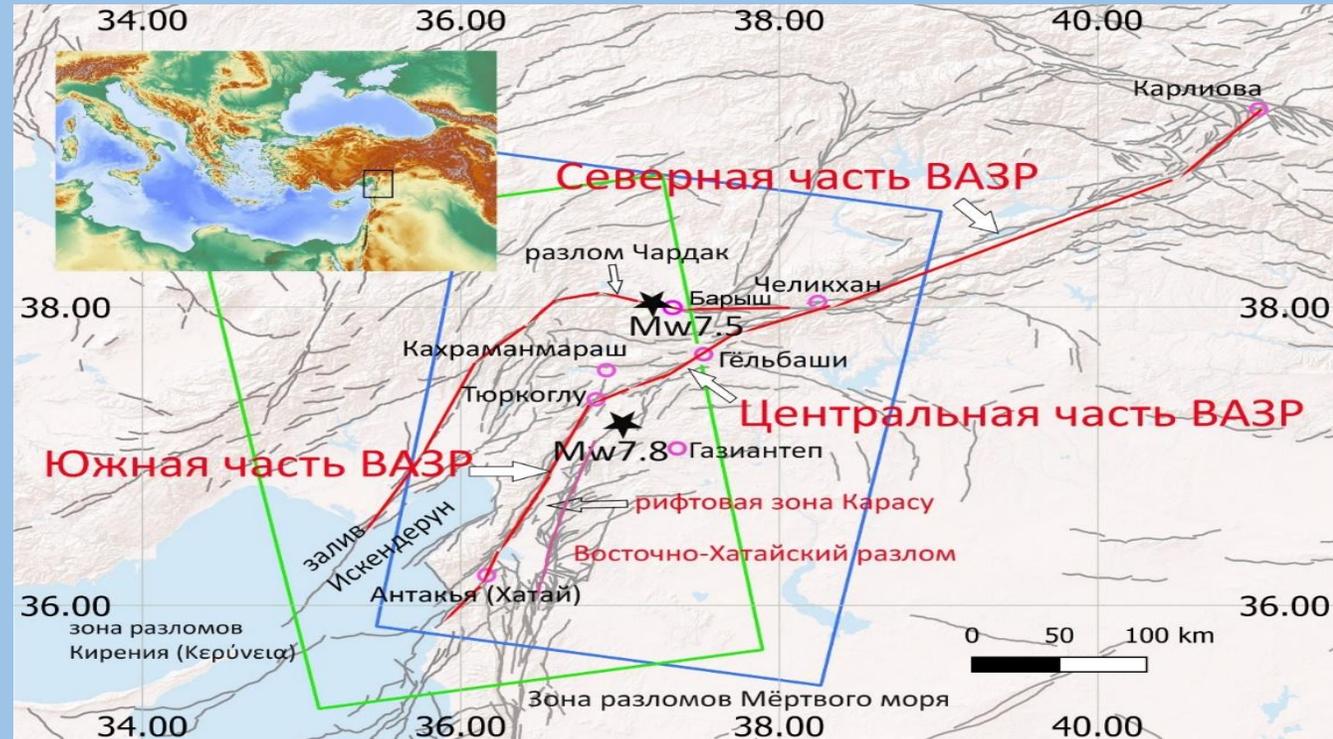
По спутниковым данным с нисходящей орбиты относительные смещения бортов ВАЗР, к которой было приурочено первое событие с магнитудой Mw 7.8, превосходили 6 м. Поверхность разрыва простирается от области землетрясения Доганьол-Сиврис 24.01.2020 Mw6.7 на севере до побережья Средиземного моря на юге, где 20.02.2023 произошло землетрясение магнитудой 6.3. Второе событие с магнитудой 7.5 приурочено к разлому Сюргу-Чардак, относительные смещения бортов которого, согласно спутниковым данным, превосходили 6 м.

Нисходящая орбита, смещения по дальности

# Тектоническая позиция землетрясения в Турции, произошедшего 06.02.2023 г.



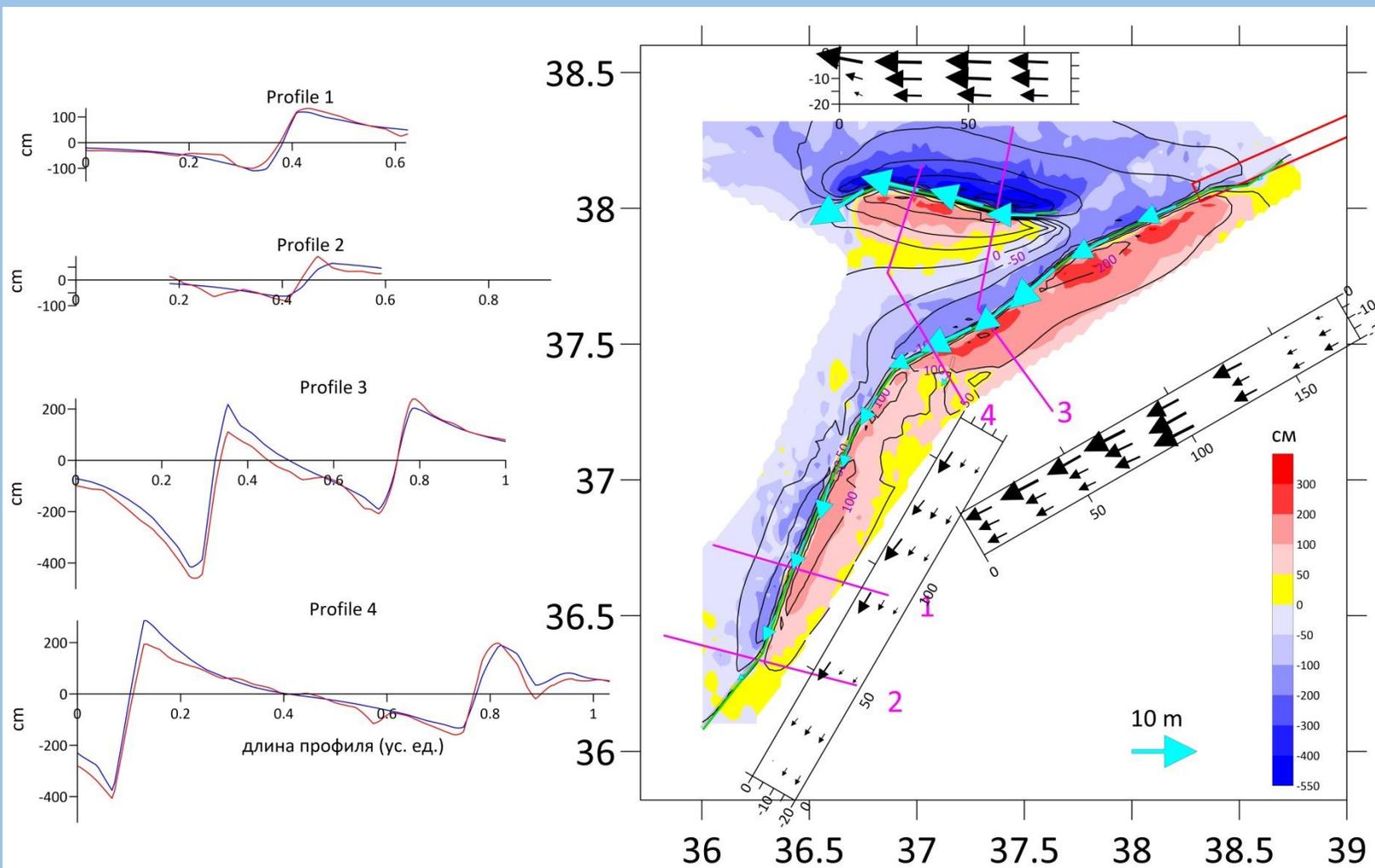
Тектоническая схема



Сдвиговые смещения достигли 5-6 м

Дата	Время (UTC)	Магнитуда
6.02.2023	01:17:35	7,8
6.02.2023	01:28:15	6,7
6.02.2023	10:24:49	7,5
6.02.2023	10:26:48	6,0
6.02.2023	12:02:11	6,0
20.02.2023	17:04:29	6,3

# Модель поверхности сейсмического разрыва землетрясений 06.02.2023, построенная по данным РСА интерферометрии.



Цветовая карта – смещения земной поверхности (в см), определенные методом офсетов по снимкам с нисходящего трека. Черные изолинии – рассчитанные по модели смещения земной поверхности. Черные прямоугольники показывают поверхность разрыва в вертикальном разрезе, со смещениями на верхнем, среднем и нижнем уровне. Максимальная длина стрелки 10.2 м в средней части северного отрезка ВАЗР. Бордовые линии – профили через область разрыва. Слева для этих профилей показаны РСА данные (красный цвет) и подбор по модели (синий цвет).

Для решения использована модель смещений на поверхности сферически расслоенной планеты в результате сдвига по падению и простираению на расположенной на заданной глубине прямоугольной площадке (Pollitz, 1996).

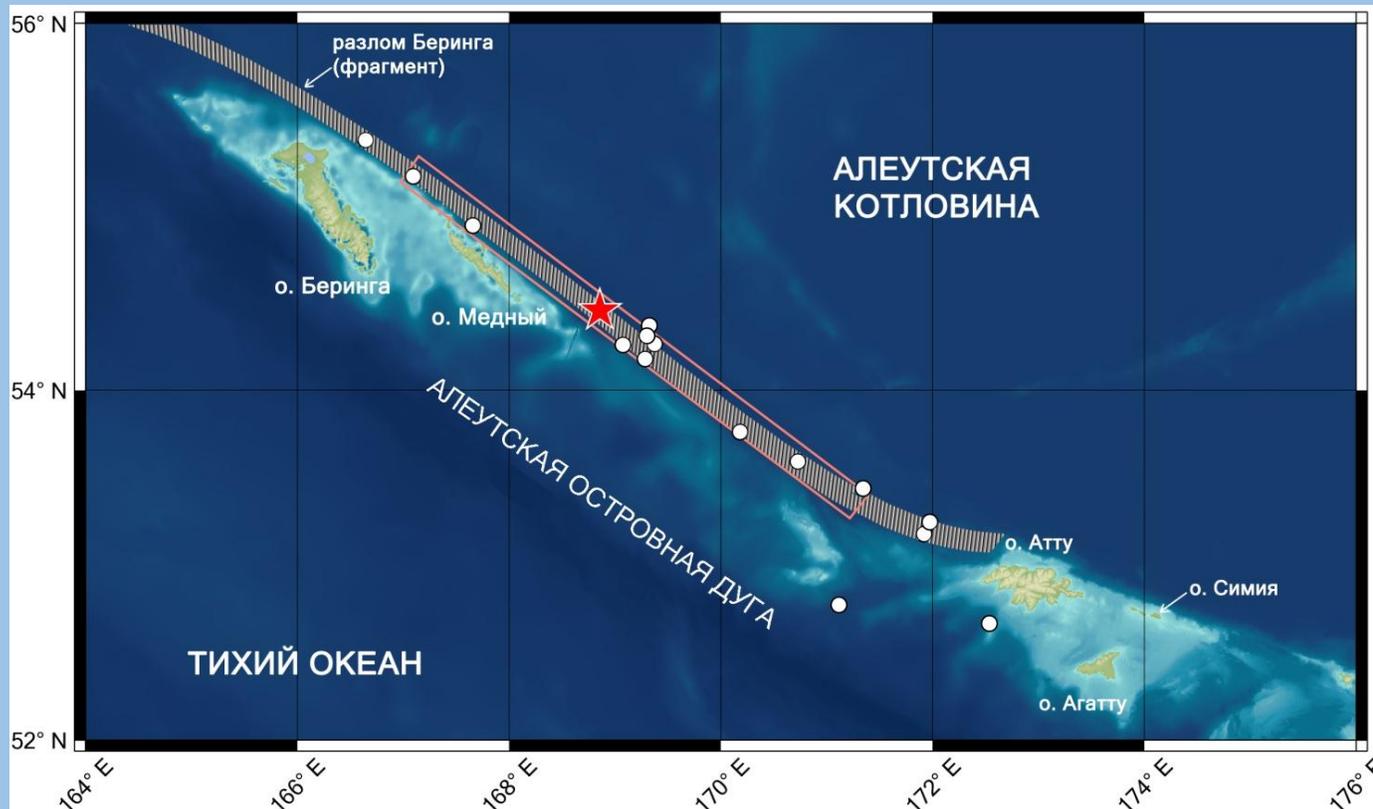
Стрелки указывают направления смещений на висячем крыле разлома. Для ВАЗР падение было задано на север под углом  $85^{\circ}$ .

# Землетрясения, для которых в ИФЗ РАН выполнены исследования методом спутниковой геодезии и гравиметрии



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

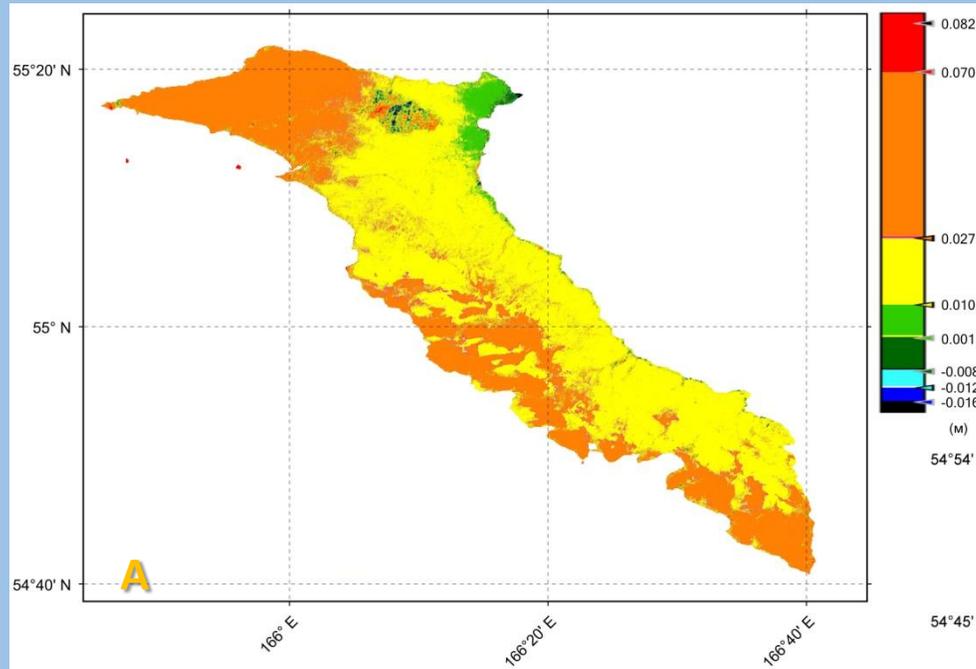
Ближне-Алеутское землетрясение (БАЗ) произошло 17.07.2017 в 23:34 UTC (18.07.2017 в 11:34 по местному времени),  $M_W = 7.6$ . Эпицентр землетрясения находился к юго-востоку от о. Медный, у подножья склона шельфа в 200 км от пос. Никольское (о. Беринга), и имел координаты  $54.443^\circ$  с.ш. и  $168.857^\circ$  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).

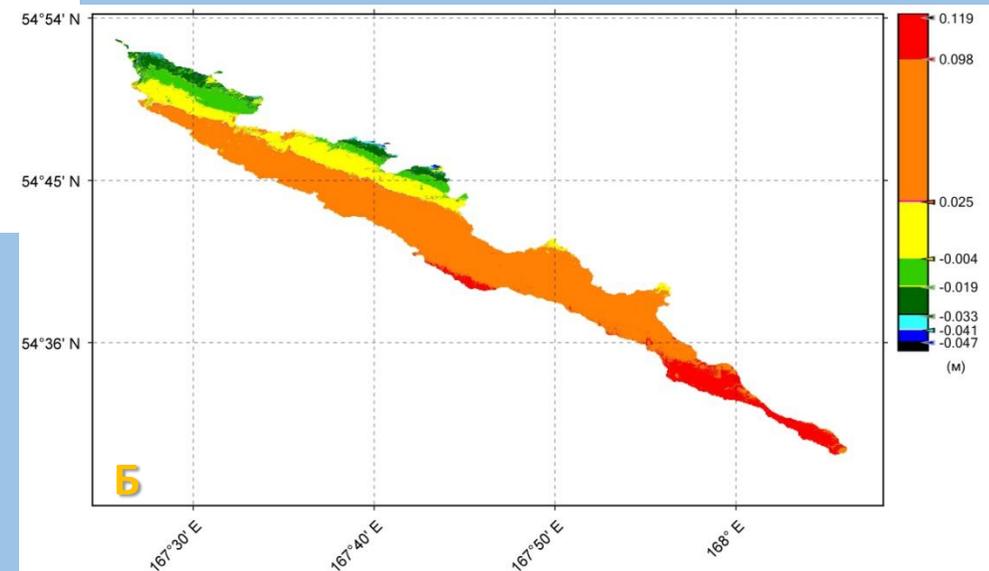
# Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г. на основе данных РСА-интерферометрии

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)

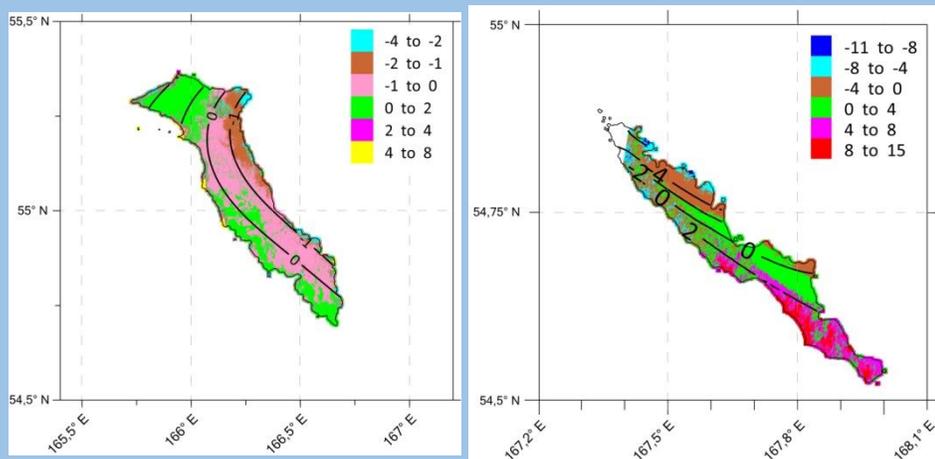


Смещения характеризуют косейсмические и постсейсмические события, произошедшие за 6 дней после БАЗ.

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

## Решение обратной задачи

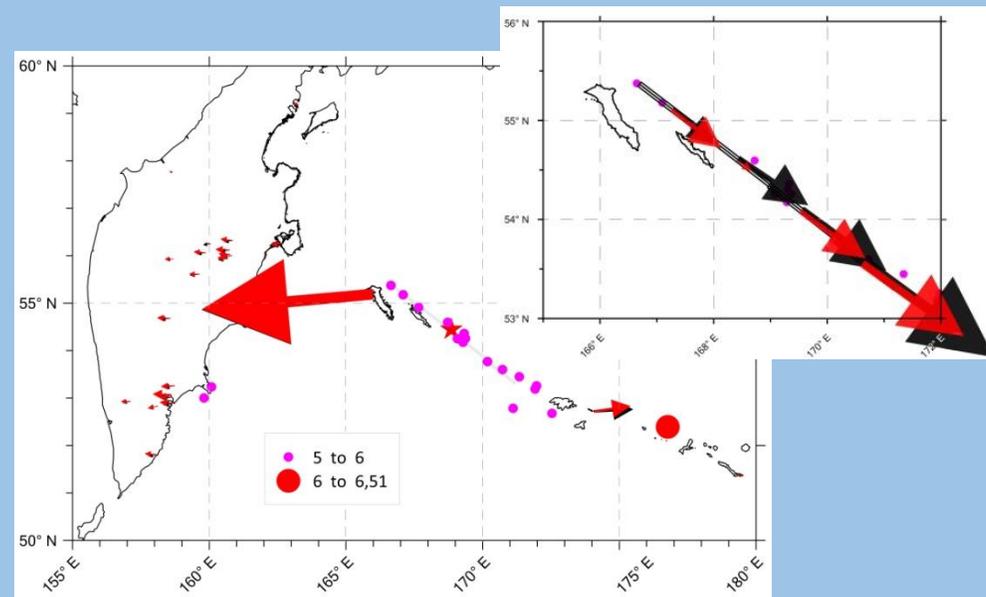
**Поля смещений в очаговой области землетрясения БАЗ для модели, состоящей из прямоугольного разрыва длиной по простиранию 370 км, разделенного на четыре равных элемента по простиранию и два по падению.**



Смещения (в см) в направлении на спутник на о. Беринга (слева) и о. Медный (справа).

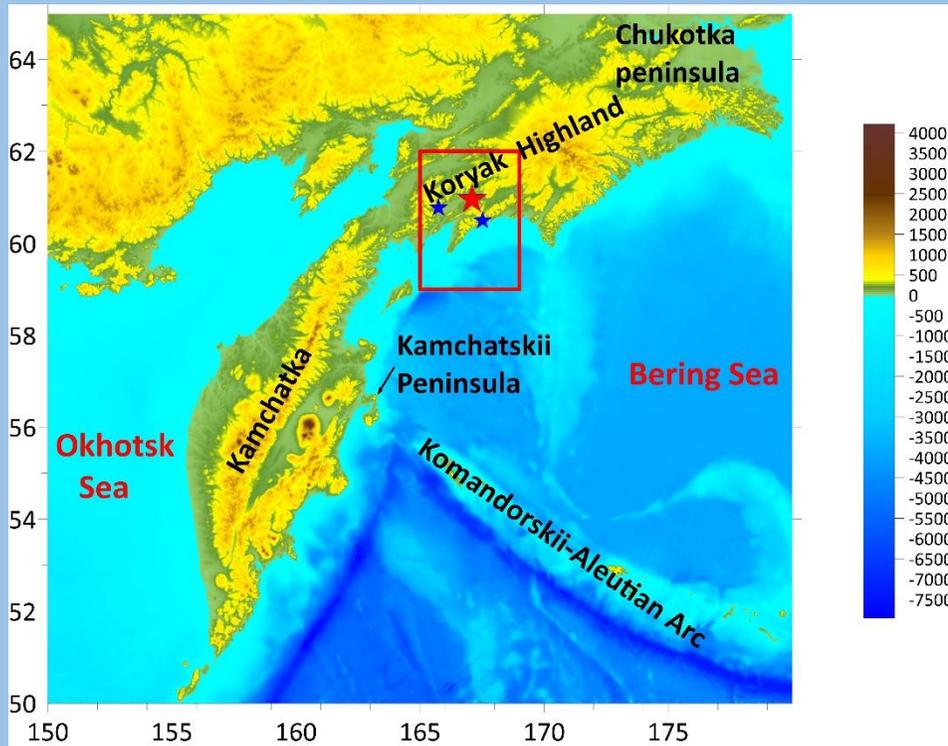
Цветовая шкала – РСА-данные, изолинии – полученное решение.

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.

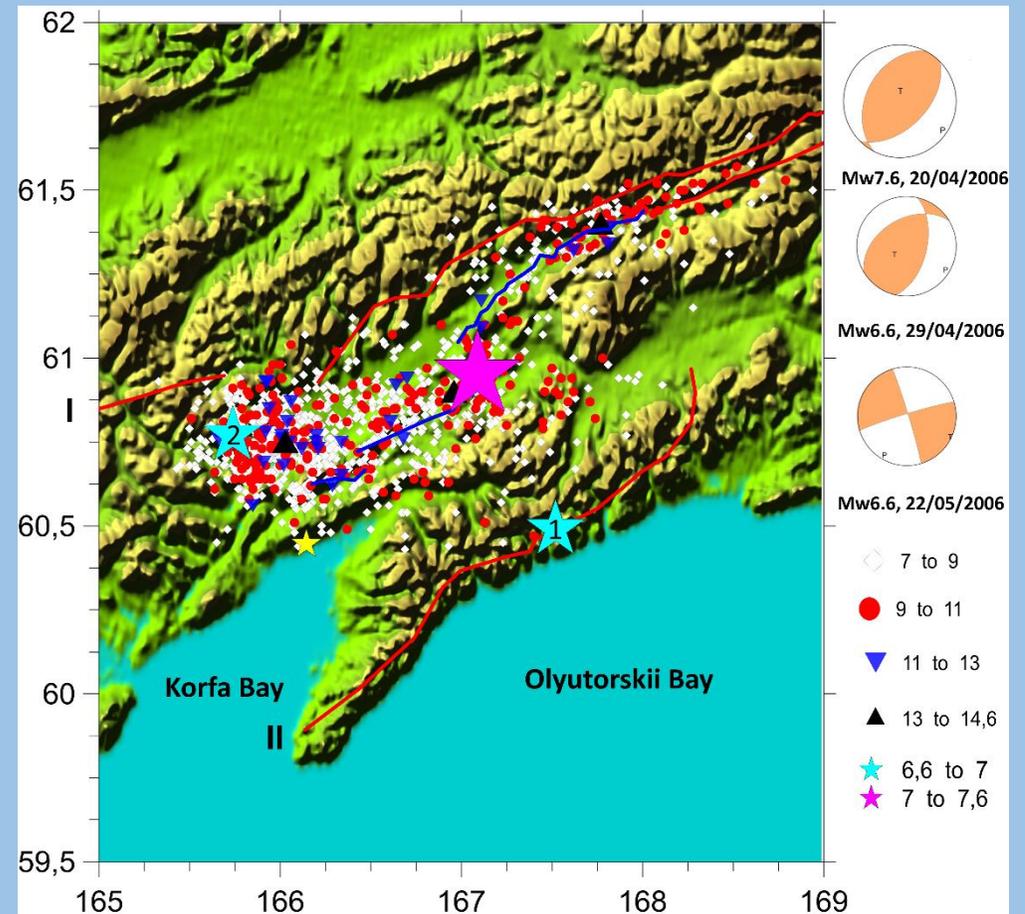


Сравнение смещений на пунктах GPS (красные стрелки – расчетные, черные – измеренные). Модель поверхности разрыва (врезка): красные стрелки – смещения на глубоких элементах, черные – на более мелких.

# Олюторское землетрясение 20/04/2006



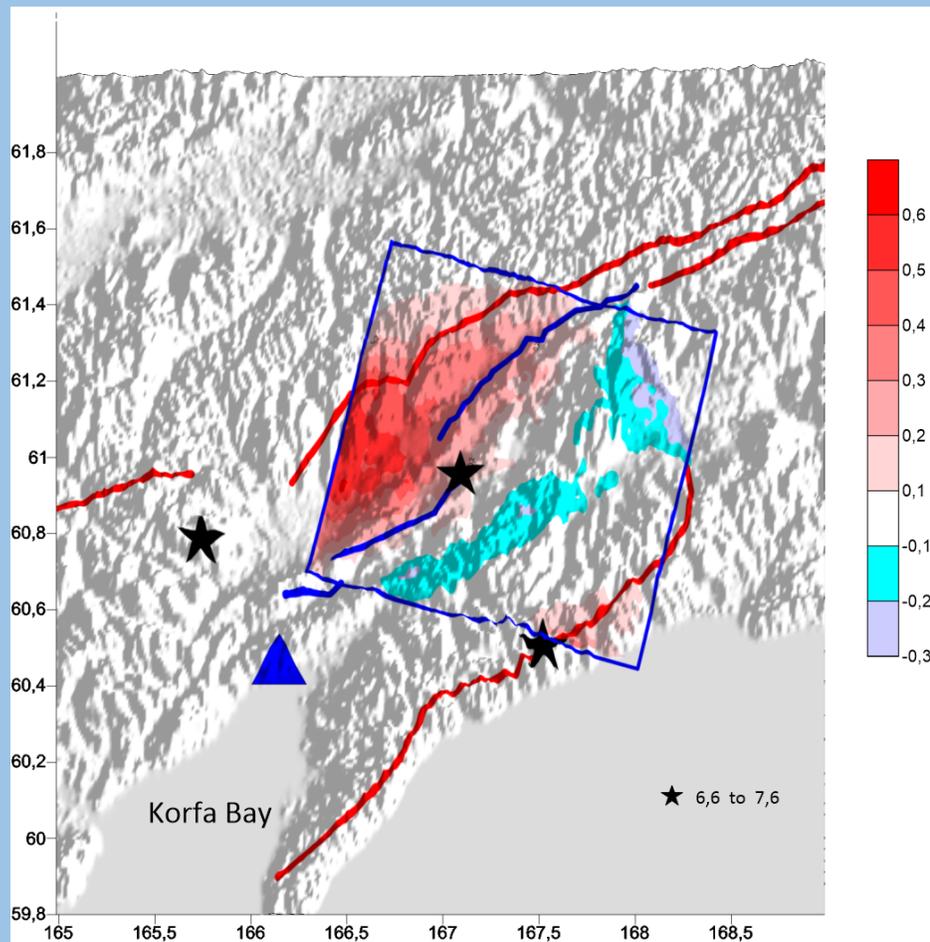
Область Олюторского землетрясения 20/04/2006



Звезды – эпицентр Олюторского землетрясения и двух его главных афтершоков. Остальные афтершоки различных энергетических классов показаны символами. Синие линии – сейсморазрывы, закартированные на дневной поверхности, красные линии – региональные разломы : *I* – Вывенско-Ватынский и *II* – Ветловский.

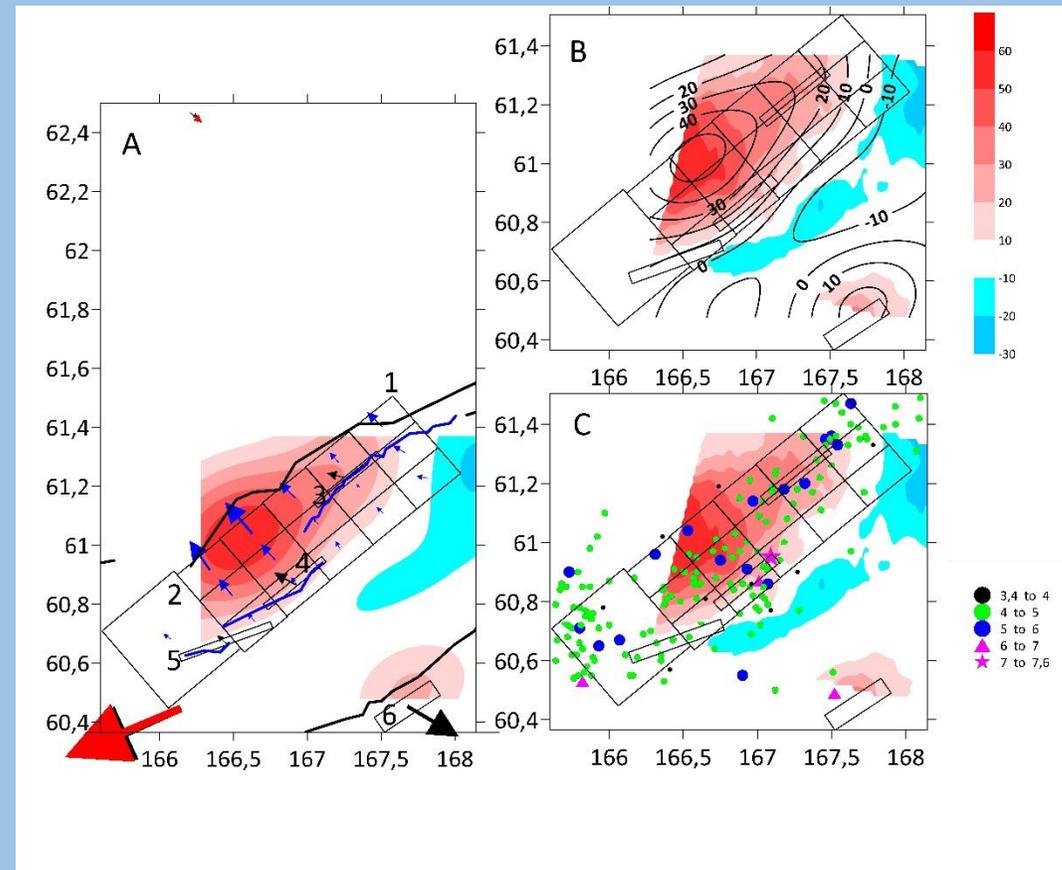
Ландер А.В., Пинегина Т.К. Парадоксы очага Олюторского землетрясения 2006 глубинная структура и динамика // Сб. тр. Второй региональной научно-технич. конф. “Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России”. Отв. ред. Чебров В.Н., КФ ЕГС РАН. 2010.С. 131–136.

# Модель поверхности разрыва Олюторского землетрясения по данным спутниковой радарной интерферометрии и GPS



Поле косейсмических смещений земной поверхности, построенное по радарным снимкам спутника ERS-2

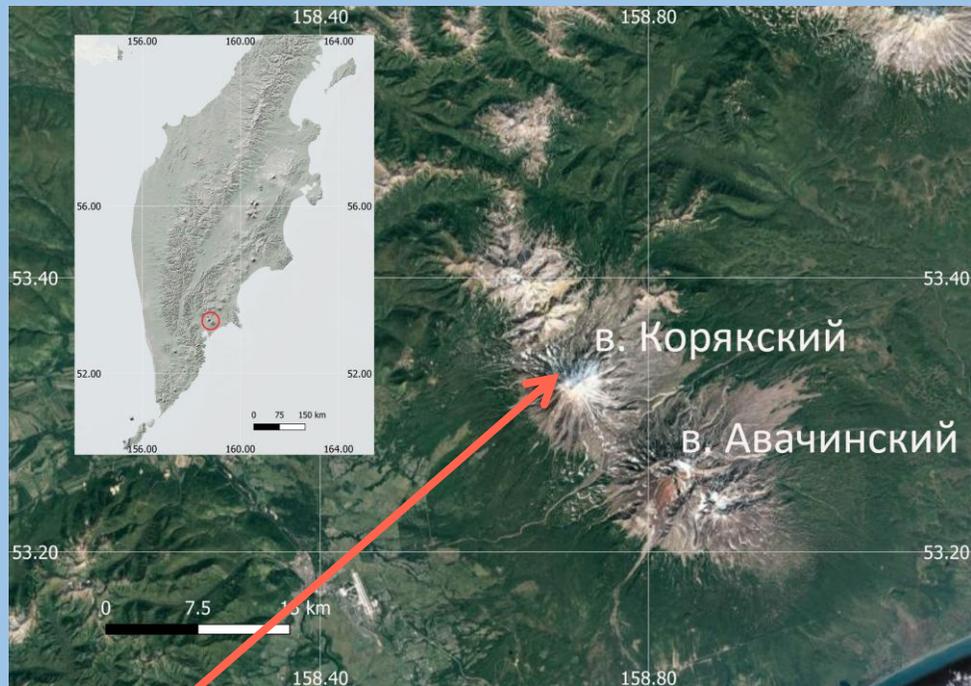
Mikhailov V.O., Timoshkina E.P., Diament M., Smirnov V.B. Enigma of the Olyutorskii Earthquake Resolved by SAR interferometry. Pure and Applied Geophysics. 2023 v. 180 (#10), pp. 3423 – 3433



Модель поверхности сейсмического разрыва.

Цветная карта – смещения по спутниковым данным, изолинии – смещения по модели. Стрелки – смещения на висячем крыле разломов 1-6. Совмещенные красные и черные стрелки – смещения на пунктах GPS.

# Извержения вулкана Корякский в 2008 – 2009 гг.



## Гипотеза I: Извержение фреатическое.

Активизация вызвана проникновением подземных вод в зону высоких температур.

Такое заключение сделано на основе результатов анализов пеплов извержения 2008-2009 гг. (Максимов и др., 2011)\*.

## Гипотеза II: Активизация вулкана связана с процессами в магматическом очаге.

О чём свидетельствует анализ сейсмичности, который выявил последовательность кластеров землетрясений в широком диапазоне глубин (от -10 - 14 км глубины до +2 км в самой постройке) (Кирюхин и др., 2017; Иванов, 2010)\*.

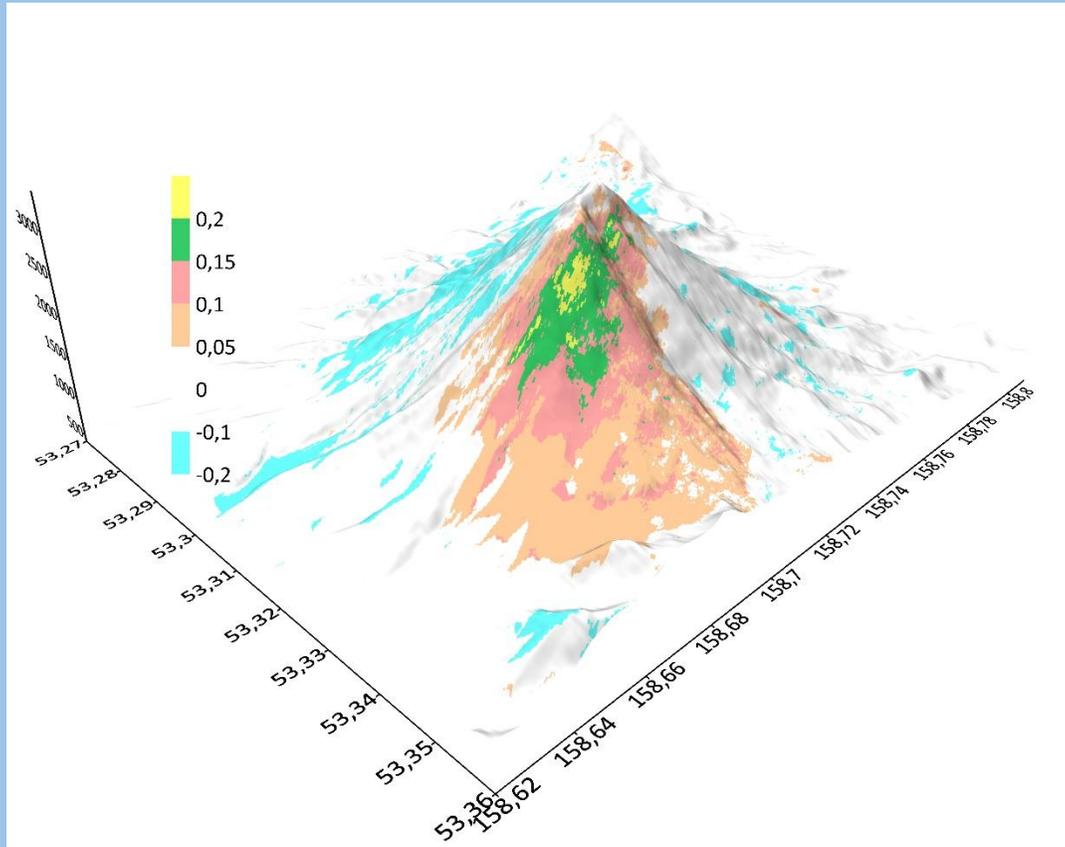
Фумаролы располагались по радиальной трещине на высоте 2850 м и 2950 м – с-з склон.

*Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В.. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017, №5. С. 3-17*

*Иванов, В. В. Активизация вулкана Корякский (Камчатка) в конце 2008–начале 2009 гг.: оценки выноса тепла и водного флюида, концептуальная модель подъема магмы и прогноз развития активизации // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30-31 марта 2009 г.) 2010. С. 24-38.*

*Максимов А. П., Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Овсянников А. А., Чубаров В. М. Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, 2011, №2. С. 73-86.*

# Поле смещений поверхности вулкана Корякский за период с 16.08.2007 по 06.10.2009

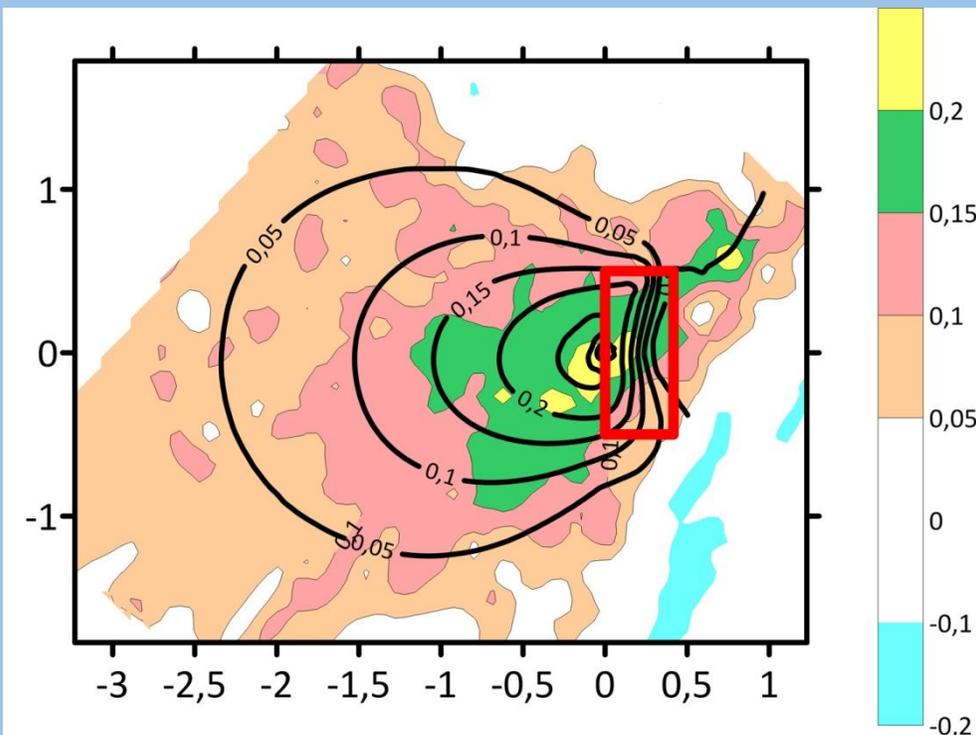


Смещения (цветовая шкала в метрах), полученные по парной интерферограмме, построенной по снимкам 16.08.2007 и 06.10.2009 спутника ALOS-1. Отрицательные значения – смещения от спутника, положительные – к спутнику. Теневой рельеф построен по ЦМР SRTM. Вертикальная шкала – высоты рельефа в метрах, горизонтальные – координаты в градусах.



Фумаролы на склоне вулкана Корякский

# Интерпретация поля смещений моделью дайки



Вулкан Корякский. Карта смещений в м (LOS) (16.08.2007 – 06.10.2009). Размеры 1\*2.4 км, Угол падения 80 град. Мощность 0.64 м.

## I. Пепел?

Известно, что (Максимов и др, 2011; Гирина и др., 2010)\* :

- а) пеплы лежали отдельными пятнами на снегу;
- б) мощность пепловых отложений составляла первые сантиметры;
- в) отложения пепла вызвали таяние снежного покрова.

## II. С другой стороны...

а) Суммарный объём полученный по DInSAR данным

$$V = 1.5 * 10^6 \text{ м}^3$$

б) (Гордеев, Дрознин, 2010)\* – оценка термальной энергии извержения ( $10^9$  МДж) соответствует кристаллизации магмы объёмом  $V = 10^6 \text{ м}^3$ .

в) (Кирюхин и др., 2017)\* – моделирование инъекции магмы в трещину. Получена величина раскрытия трещины объёмом  $V = 1.2 * 10^6 \text{ м}^3$ .

Максимов А. П., Аникин Л. П., Вергасова Л. П., Овсянников А. А., Чубаров В. М. Пеплы извержения Корякского вулкана (Камчатка) в 2009 г.: особенности состава и генезис // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле, 2011, №2. С. 73-86.

Гирина О. А., Маневич А. Г., Мельников Д. В., Нуждаев А. А., Ушаков С. В., Коновалова О. А. Активность вулкана Корякский с октября 2008 г. по октябрь 2009 г. по данным KVERT // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский (30-31 марта 2009 г.). 2010. С. 15-23.

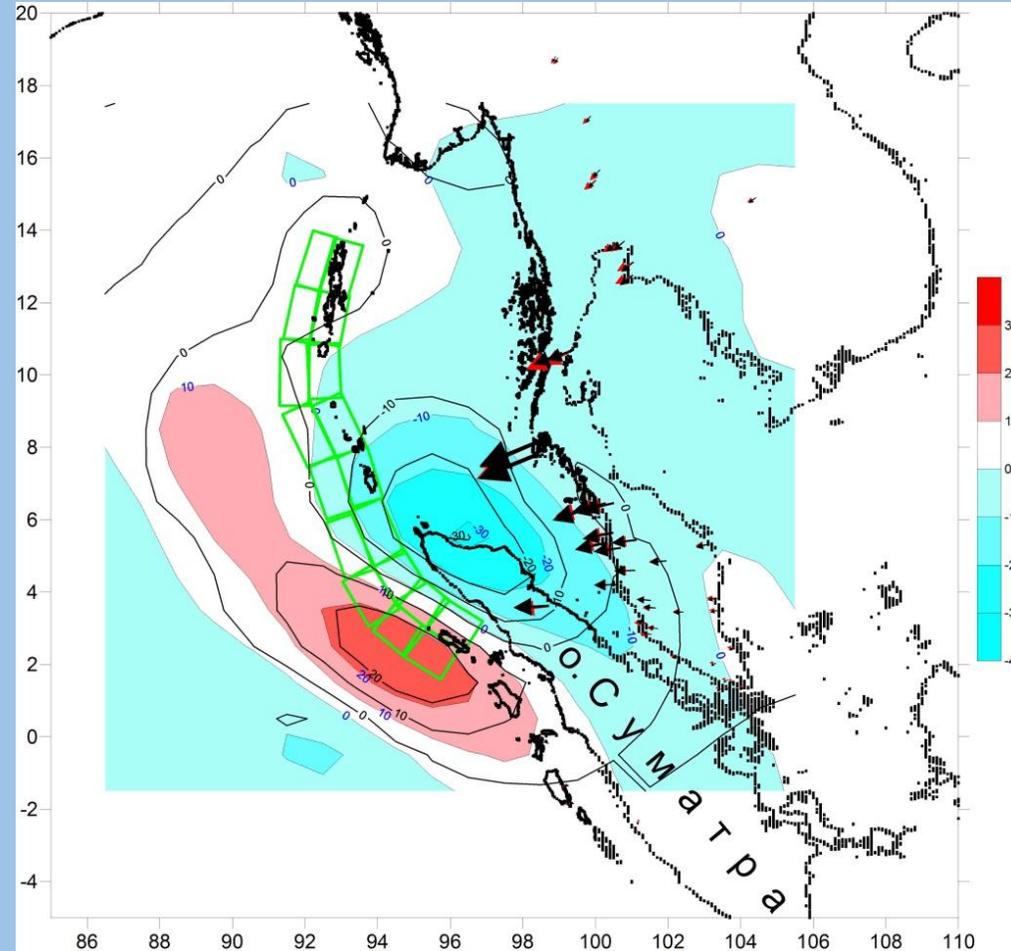
Кирюхин А. В., Федотов С. А., Кирюхин П. А., Черных Е. В.. Магматические питающие системы Корякско-Авачинской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и режима прилегающих термальных источников // Вулканология и сейсмология. 2017, №5. С. 3-17.

Гордеев Е. И., Дрознин В. А. Температура эксплозивного шлейфа извержения вулкана Корякский в 2009 г. // Доклады Академии наук, (2010). т. 430 (3), С. 349-351.

Первая тандемная пара спутников GRACE работала в космосе с марта 2002 по октябрь 2017, следующая пара GRACE-FO запущена в мае 2018 г.

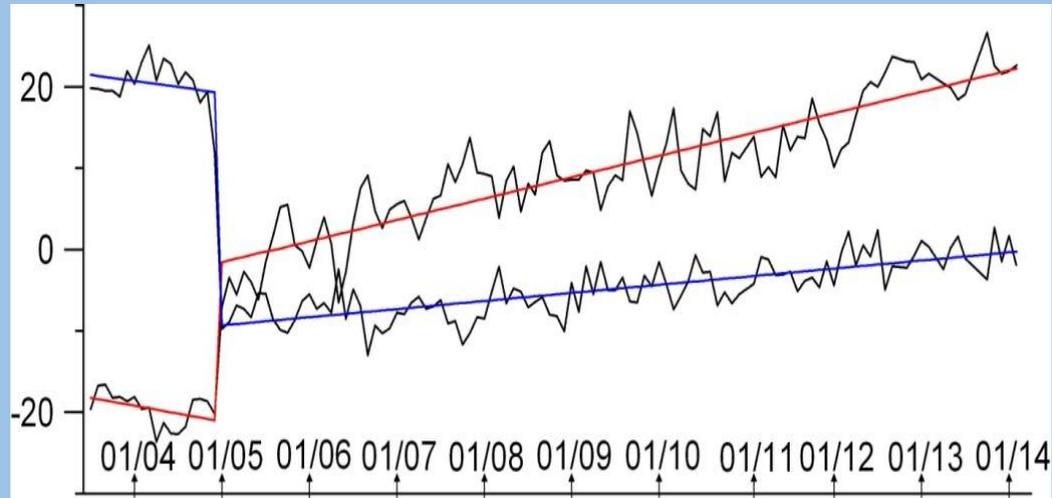
По всем собранным данным строят статические модели глобального гравитационного поля, по ежемесячным моделям глобального поля изучают его временные вариации.

# Сравнение реального гравитационного эффекта от землетрясения на Суматре 12.2004 с эффектом, рассчитанным по наиболее детальной модели, основанной на данных GPS, цунами и приливных станций

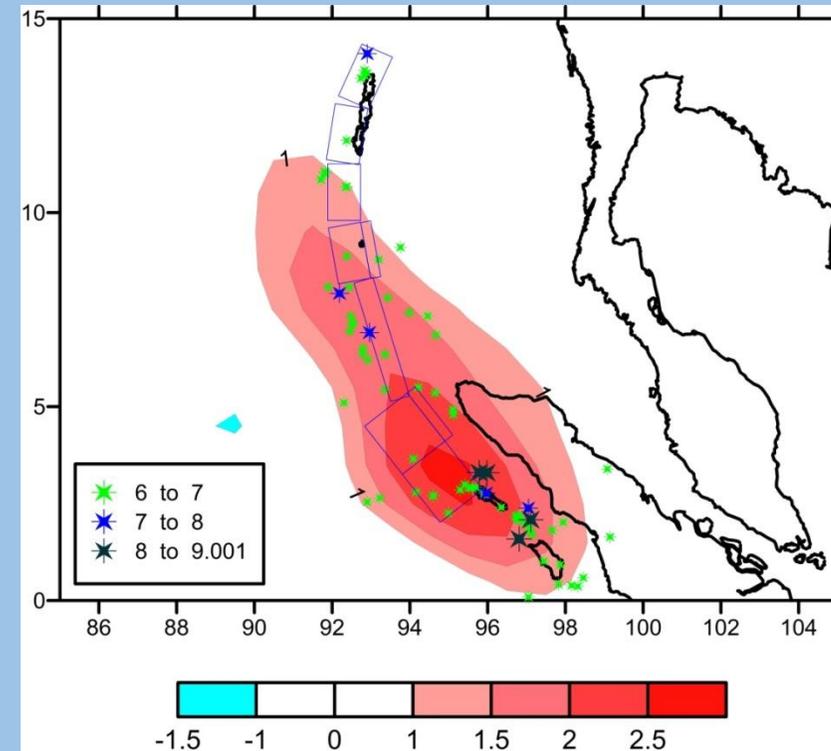


Mikhailov V., Tikhotsky S., Diament M., Panet I., Ballu V., 2004. Can tectonic processes be recovered from new gravity satellite data? *Earth and Plan. Sci. Lett.*, v. 228 (N3-4), p. 281-297.

# Временные вариации гравитационного поля в области Суматранского землетрясения 12.2004.



- Временные ряды изменения гравитационной аномалии в точках косейсмического максимума и минимума в мкГал. Линейные тренды и косейсмический скачок, аппроксимирующие косейсмические изменения в области минимума показаны синим цветом, то же в области максимума - красным цветом.

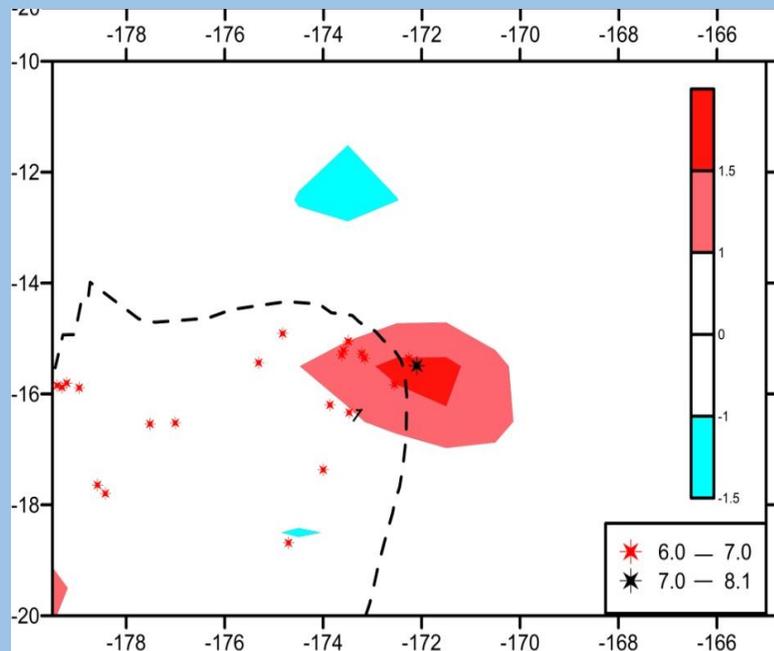


Амплитуда линейного тренда в гравитационном поле после землетрясения на Суматре 12.2004 в мкГал/год. Звездами показаны землетрясения в период с 12.2004 по 04.2014 с магнитудой более 6 по данным каталога NEIC.

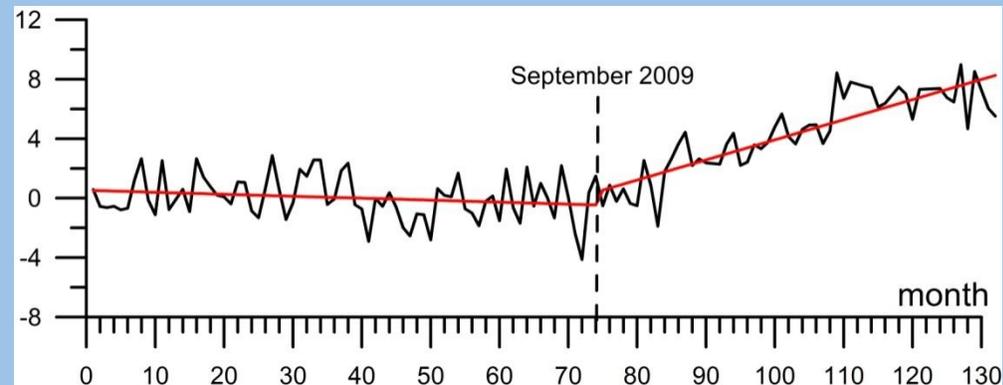
Panet, I., F. Pollitz, V. Mikhailov, M. Diament, P. Banerjee, and K. Grijalva. 2010. Upper mantle rheology from GRACE and GPS postseismic deformation after the 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems (G3)*, 11, Q06008, doi:10.1029/2009GC002905.

Mikhailov V., V. Lyakhovskiy, I. Panet, Y. van Dinther, M. Diament, T. Gerya, O. deViron, E. Timoshkina. 2013 Numerical modelling of postseismic rupture propagation after the Sumatra 26.12.2004 earthquake constrained by GRACE gravity data. *Geophysical Journal International*. Vol. 194 Issue 2, p640-650, doi: 10.1093/gji/ggt145.

# Временные вариации гравитационного поля в области землетрясения у острова Самоа 29/09/2009



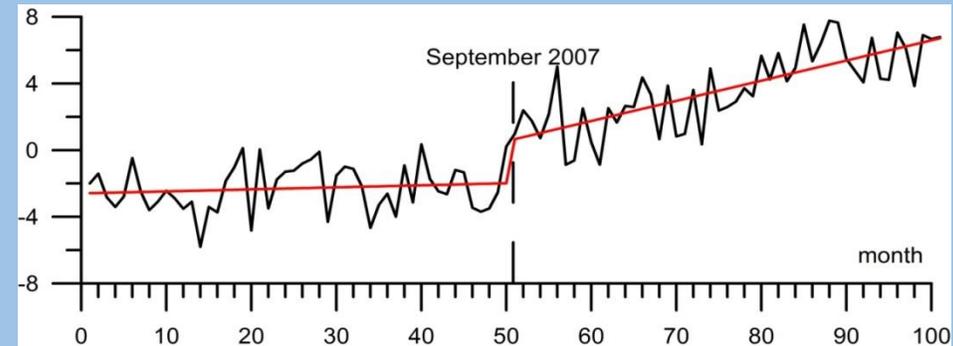
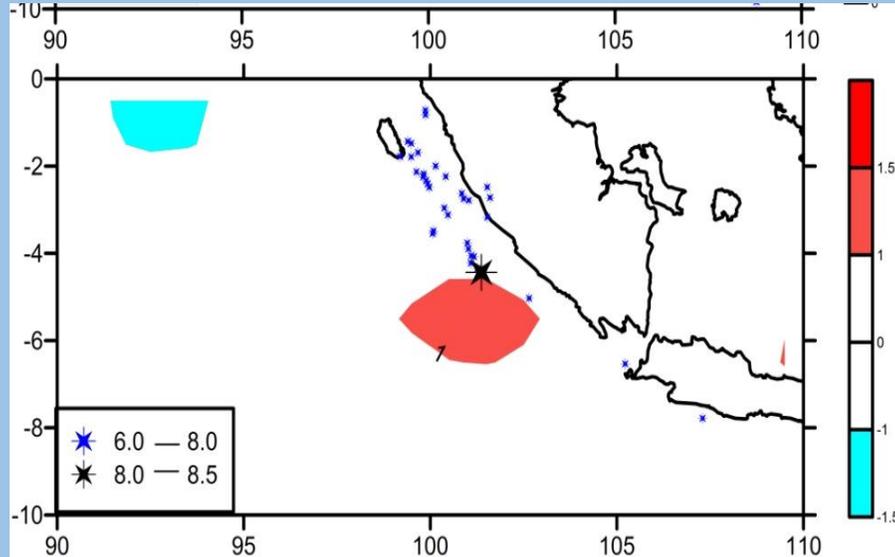
Величина линейного тренда в мкГал/год после землетрясения в районе острова Самоа 29/09/2009. Звездами показаны землетрясения за период с 09/2007 по 09/2012. Пунктиром показана зона субдукции между Тихоокеанской и Австралийской плитами.



Временные вариации гравитационной аномалии в районе максимума линейного тренда на рис. слева. Горизонтальная ось - месяцы начиная с 07/2003, вертикальная ось - амплитуда гравитационной аномалии в мкГал.

O. de Viron, I. Panet, V. Mikhailov, M. Van Camp, and M. Diament, 2008. Retrieving Earthquake Signature in GRACE Data. *Geophys. J. Int.* (2008) vol. 174, pp. 14–20. doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03807.x

# Временные вариации гравитационного поля мкГал/год после землетрясения районе о. Суматра 12/09/2007 г

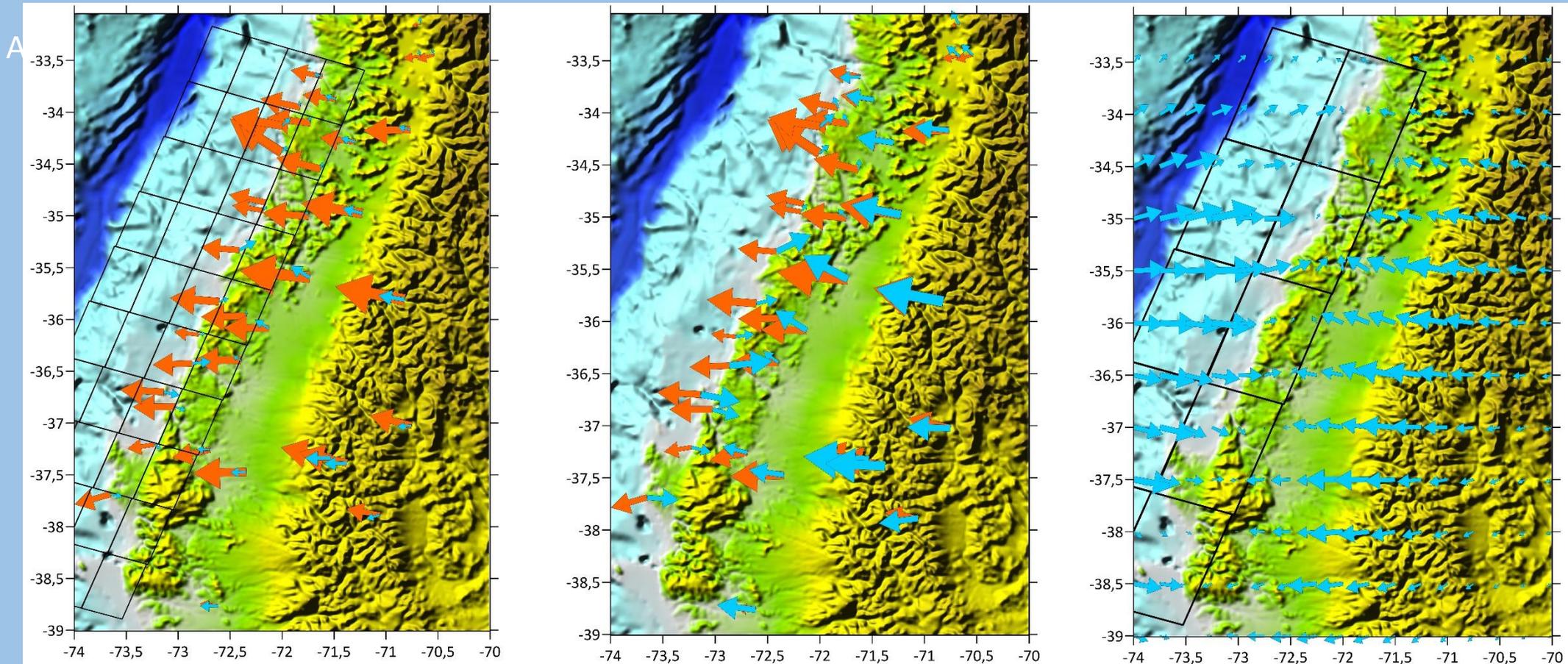


Величина линейного тренда в мкГал/год после землетрясения районе о. Суматра 12/09/2007 г. Звездами показаны землетрясения за период с 09/2007 по 03/2012 начиная с магнитуды 6.

Временной ряд изменения гравитационной аномалии в районе максимума линейного тренда на рис. слева. Горизонтальная ось - месяцы начиная с 07/2003, вертикальная ось - амплитуда гравитационной аномалии в мкГал.

Михайлов В.О., М. Диаман, А.А. Любушин, Е.П. Тимошкина, С.А Хайретдинов. 2016. Крупномасштабный асейсмический крип в областях сильных землетрясений по данным спутников ГРЕЙС о временных вариациях гравитационного поля. Известия РАН сер. "Физика Земли". №5, с.70-81.

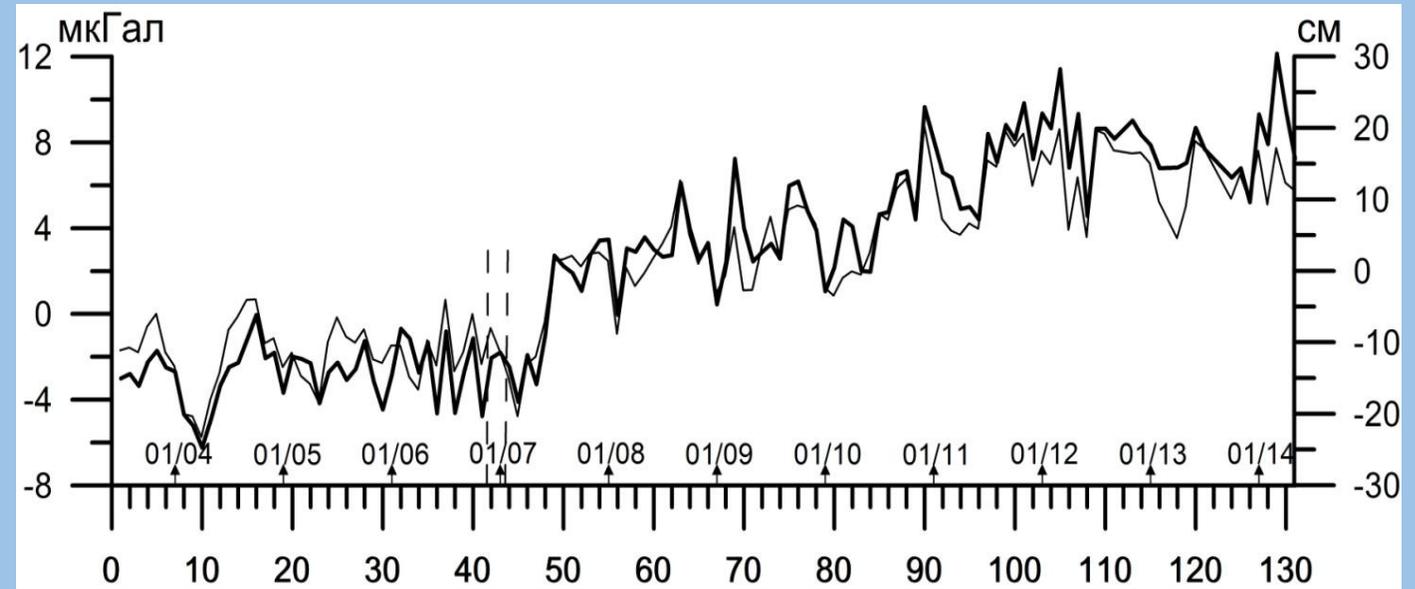
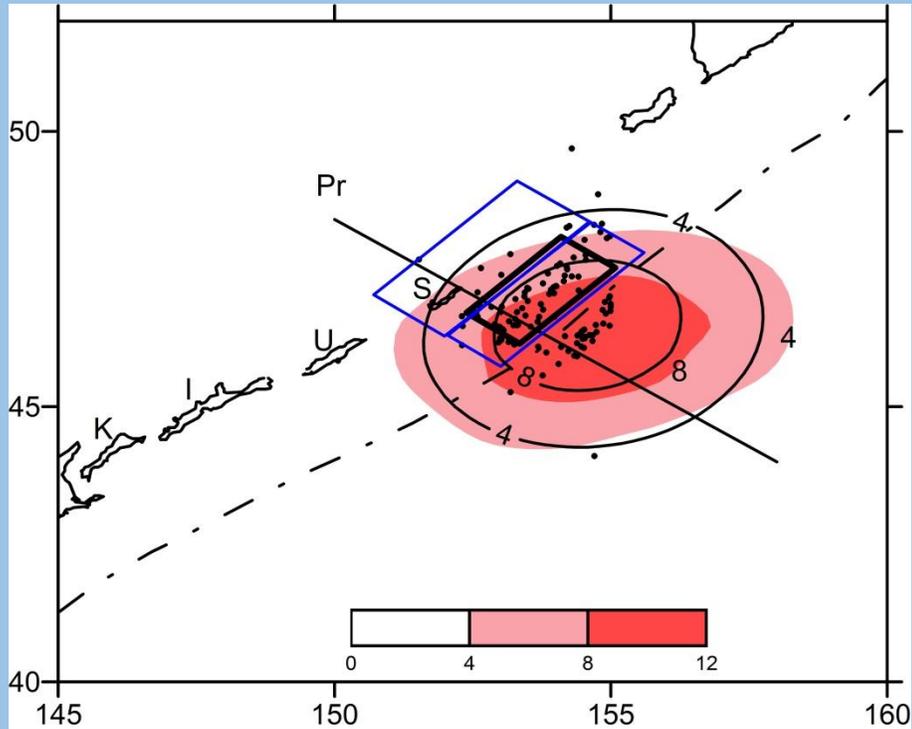
# Землетрясение Мауле, Чили, 27.02.2010



Сравнение измеренных и расчетных горизонтальных смещений в результате процесса вязкоупругой релаксации с вязкостью  $10^{18}$  Па\*с (А, В) и  $2 \cdot 10^{17}$  Па\*с (Б) с использованием построенной нами модели поверхности разрыва за период в 484 дня (до 11 июля 2011) после землетрясения.

Синие стрелки – расчетные смещения, красные стрелки – измеренные смещения на постоянной и временной сетях пунктов GPS согласно [Lin et al., 2013]. На рис. В приведены расчеты смещений (синие стрелки) на регулярной сетке для вязкости  $10^{18}$  Па\*с. Для наглядности масштаб стрелок уменьшен, по сравнению с рис. А и Б.

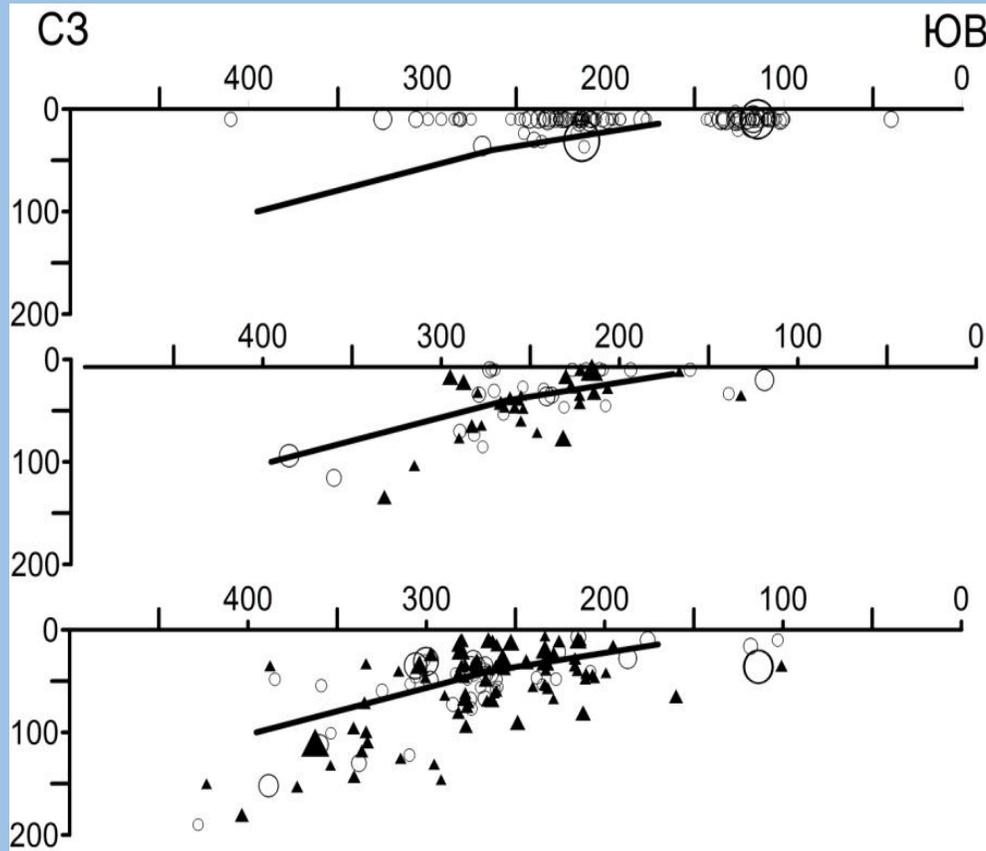
# Временные вариации гравитационного поля в районе Симуширского землетрясения 15/11/2006



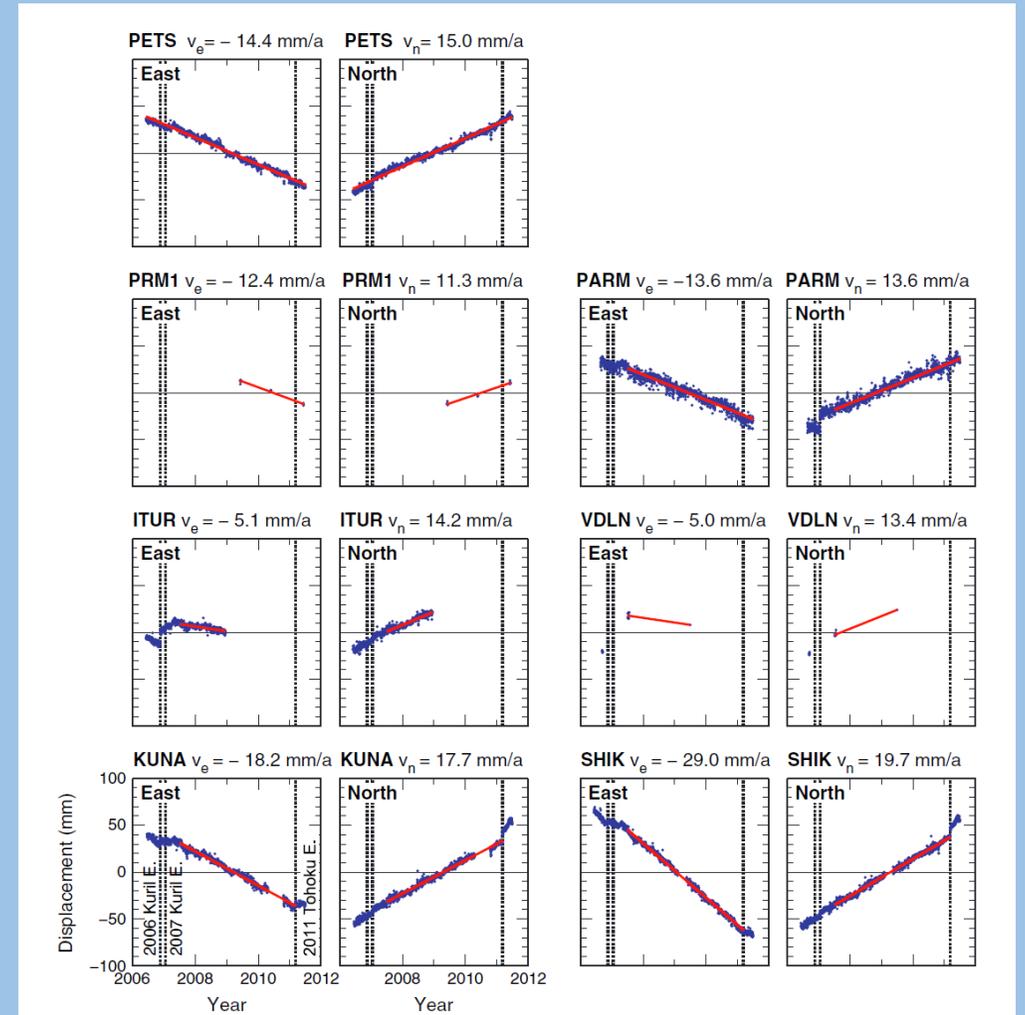
Слева - суммарная амплитуда линейного тренда в гравитационном поле по данным спутников Грейс за период с 05/2007 по 07/2012 в мкГал (цветовая шкала). Точки - эпицентры землетрясений за период с 11/2006 по 12/2007 по данным каталога NEIC. Острова: Кунашир (K), Итуруп (I), Уруп (U), Симушир (S). Положение океанического желоба показано штрихпунктирной линией.

Справа - изменение во времени аномалии гравитационного поля в области максимума тренда. Аномалия  $V_2$  в мкГал (жирная линия, левая вертикальная ось) и соответствующая ей толщина эквивалентного слоя воды в см (тонкая линия, правая ось). Горизонтальная ось - время (месяц, год) начиная с 07/2003 г. Вертикальные пунктирные линии показывают время землетрясений 11.2006 и 01.2007.

# Развитие афтершокового процесса и постсейсмические смещения в районе Симуширского землетрясения 15/11/2006

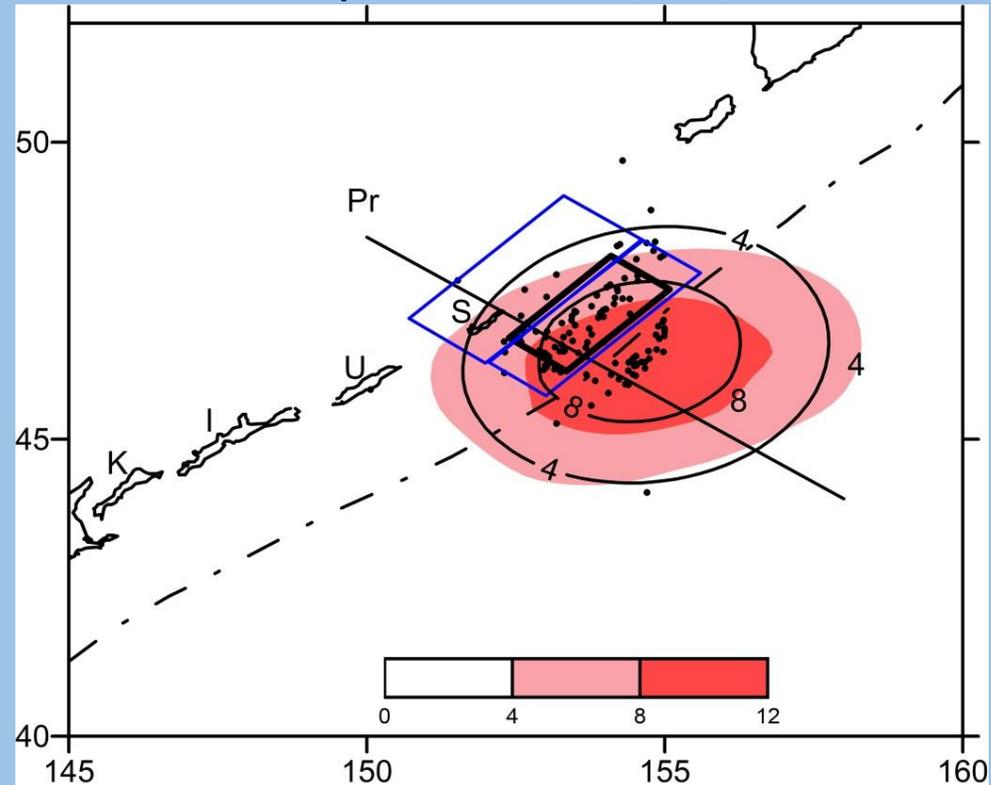


Гипоцентры землетрясений в полосе шириной 200 км вдоль профиля, пересекающего максимум линейного тренда. Вверху - события 11/2006 - 02/2007; в середине - 03/2007 - 12/2007 (круги) и за весь 2008 г (треугольники); внизу - 2009-2010 гг (круги) и 2011-05/2014 (треугольники). Размер символов пропорционален магнитуде. Сплошная линия – кровля погружающейся плиты



Временные ряды смещений на пунктах GPS Курильской сети (Kogan et al., 2013)

## Временные вариации гравитационного поля в районе Симуширского землетрясения 15/11/2006



Суммарная амплитуда линейного тренда в гравитационном поле по данным спутников Грейс за период с 05/2007 по 07/2012 в мкГал. Изолинии - амплитуда гравитационной аномалии, рассчитанной от смещения в 3.0 м на верхней и 1.5 м на нижней плоскости, которые моделируют область косейсмических смещений на контакте плит.

Проекция плоскостей на дневную поверхность показаны непрерывной линией. Жирная линия внутри верхней плоскости – проекция модели поверхности косейсмического разрыва.

Точки - эпицентры землетрясений за период с 11/2006 по 12/2007 по данным каталога NEIC. Острова: Кунашир (K), Итуруп (I), Уруп (U), Симушир (S). Положение океанического желоба показано штрихпунктирной линией.

# Выводы

- Современные данные спутниковой геодезии (ГНСС, Радарная интерферометрия) и гравиметрии поставляют важную информацию о косейсмических и постсейсмических процессах в областях землетрясений.
- Поля смещений земной поверхности совместно с другими данными геологии и геофизики позволяют определить геометрию поверхности сейсмического разрыва и произошедшие на ней смещения.
- Определение относительной роли процесса вязкоупругой релаксации и постсейсмического крипа является важной задачей для геодинамики (в частности, для оценки эффективной вязкости астеносферы) и для сейсмологии (в том числе для более точного определения размеров запертых участков разломных зон). Эта задача успешно решается с использованием данных о временных вариациях гравитационного поля.
- Решение обратных задач в рамках геодинамических моделей является эффективным инструментом для исследования многих геодинамических процессов. Предложенный в 1974 г, этот подход постепенно внедряется в практику работ по изучению сейсмических, вулканических и других процессов.