

## Модель поверхности разрыва Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 по данным спутниковой радарной интерферометрии

В. О. Михайлов<sup>1,2</sup>, В. А. Тимофеева<sup>1</sup>, М. С. Волкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия*  
*E-mail: v.a.timofeeva@iperas.ru*

<sup>2</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова*  
*Москва, 119991, Россия*

29 марта 2017 г. в 04:09:24 по Гринвичу (16:09:24 по местному времени) в западной части Берингова моря произошло землетрясение, магнитуда которого составила  $M_W = 6,6$ . Данные о параметрах землетрясения различных мировых сейсмологических центров разнятся. По сведениям NEIC, эпицентр землетрясения расположен в 81 км от пос. Усть-Камчатск ( $56,940^\circ$  с. ш.,  $162,786^\circ$  в. д.). В глобальном каталоге GCMТ указаны иные координаты эпицентра —  $57,00^\circ$  с. ш.,  $163,15^\circ$  в. д. Согласно данным Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (Чебров и др., 2017), гипоцентр землетрясения находился примерно в 90 км к северо-востоку от Усть-Камчатска на глубине ~43 км и имел координаты  $57,0^\circ$  с. ш.,  $163,2^\circ$  в. д., т.е. эпицентральная область, очерченная афтершоками, располагалась в южной части зал. Озерной, исходя из чего это землетрясение и было названо Южно-Озерновским (ЮОЗ). Определение косейсмических смещений ЮОЗ по данным стационарных пунктов Глобальной навигационной спутниковой сети оказалось невозможным ввиду их разреженности и удалённости от эпицентра события. Определить параметры поверхности разрыва методом анализа волновых форм также не удалось из-за небольшой магнитуды события и его удалённости от станций мировой сейсмологической сети. Поэтому применение спутниковой радарной интерферометрии стало практически единственной возможностью определить смещения на земной поверхности и построить модель поверхности разрыва. Также поля смещений земной поверхности позволяют уточнить положение очага землетрясения. Нами было обработано 50 интерферометрических пар снимков: спутника Sentinel-1A с нисходящей орбиты 89-го трека, а также спутника ALOS-2 с нисходящей орбиты 9-го трека и восходящей орбиты 108-го трека. Снимки по возможности отбирались за летний период, чтобы устранить влияние снежного покрова. Полученные поля смещений земной поверхности в направлении на спутник по парам снимков спутника ALOS-2 достигают 33 см. Подвижка в очаге по данным моделирования, как и по данным сейсмологии, — это пологий ( $51^\circ$ ) надвиг с небольшой правосторонней сдвиговой компонентой. Поверхность разрыва имеет простирание  $213^\circ$ , глубину верхней кромки 3,8 км, длину по простиранию 12,9 км, по падению — 9,1 км. Средняя амплитуда смещений составила 1,85 м.

**Ключевые слова:** Южно-Озерновское землетрясение, модель поверхности разрыва, спутниковая радарная интерферометрия, ДЗЗ из космоса, дифференциальная РСА-интерферометрия

Одобрена к печати: 30.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-143-152

### Сейсмичность региона

Курило-Камчатская зона субдукции — один из самых сейсмически активных регионов мира. Здесь процесс погружения Тихоокеанской плиты сопровождается сильными землетрясениями, очаговые зоны которых располагаются в земной коре и верхней мантии вплоть до глубин в 600 км. Граница между плитой Берингия (Гордеев и др., 2015), выделяемой в пределах Северо-Американской плиты, и Тихоокеанской плитой в западной части Алеутской дуги является трансформной границей. Здесь землетрясения происходят как вдоль Алеутского жёлоба, так и в его тылу, в Беринговом море. В этом регионе довольно часто возникают сильные (с магнитудой  $M_W \geq 6,5$ ) и очень сильные (с  $M_W \geq 8$ ) сейсмические события. Однако в изучаемом нами районе зал. Озерной в западной части Берингова моря у северо-восточного побережья Камчатки с начала XX в. кроме Южно-Озерновского (ЮОЗ) зафиксировано лишь три

сильных землетрясения: 15.04.1945 ( $M_W = 7,1$ , глубина  $d = 35$  км) в 150 км северо-восточнее Усть-Камчатска; 25.10.1945 в 114 км северо-восточнее Усть-Камчатска ( $M_W = 6,5$ ,  $d = 15$  км) и самое сильное из них 23.11.1969 ( $M_W = 7,4$ ,  $d = 35$  км) с очаговой зоной протяжённостью около 100 км, расположенной в Тихоокеанском подвижном поясе, на стыке Курило-Камчатской и Алеутской дуг (Федотов и др., 1973). Эпицентр ЮОЗ 2017 г., по данным GCMТ (англ. The Global Centroid-Moment-Tensor (CMT) Project, <https://www.globalcmt.org>), расположен примерно в 94 км юго-западнее эпицентра землетрясения 1969 г.

## Параметры землетрясения по данным сейсмических станций

Южно-Озерновское землетрясение, магнитуда которого составила  $M_W = 6,6$  (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us20008vhl/executive>), произошло 29 марта 2017 г. в 04:09:24 по Гринвичу (16:09:24 по местному времени) в западной части Берингова моря. По данным Регионального информационно-обрабатывающего центра (РИОЦ) «Петропавловск», ЮОЗ и его афтершоки произошли под акваторией зал. Озерной (Чебров и др., 2017). Эпицентр землетрясения, по данным РИОЦ, располагался восточнее эпицентра, установленного NEIC (англ. National Earthquake Information Center — Национальный центр информации о землетрясениях, США) Геологической службы США, ближе к эпицентру согласно глобальному каталогу GCMТ. Оба последних решения основаны на данных удалённых от Камчатки станций. Отмечается, что координаты землетрясений, полученные в РИОЦ «Петропавловск», находятся в согласии со значениями азимутов, рассчитанных независимыми методами, что подтверждает их достоверность.

Также в работе (Чебров и др., 2017) формально оценена длина очаговой зоны ЮОЗ, равная 25 км, и ширина — 17 км. За почти четыре месяца после землетрясения в очаговой области ЮОЗ зарегистрировано 440 афтершоков с энергетическим классом  $K_s$  от 5,8 до 12,5, более 40 % из которых произошло за первые сутки после главного толчка. Отмечается, что практически все афтершоки ЮОЗ произошли в пределах южной части облака афтершоков Озерновского землетрясения 1969 г. Ось растяжения сброшенных напряжений механизма очага субвертикальна, а ось сжатия — субгоризонтальна и ориентирована вдоль направления юго-восток — северо-запад. Тип движения по обеим нодальным плоскостям — преимущественно взброс.

Относительно тектонической принадлежности ЮОЗ отмечается, что по своему географическому положению оно может быть отнесено как к области сочленения Курило-Камчатской дуги с Алеутской дугой, так и к Корякскому сейсмическому поясу. В пользу второй гипотезы, т. е. к принадлежности ЮОЗ к процессам, порождённым коллизией микроплиты Берингия (Гордеев и др., 2015) с Охотоморской плитой, говорит не только географическое положение, но и хорошее соответствие механизмов главного события и его афтершоков всем ранее известным оценкам для землетрясений южной части Корякского пояса.

Оценка смещений на земной поверхности осложняется тем, что в рассматриваемом районе сеть GPS-наблюдений (англ. Global Positioning System — система глобального позиционирования) неплотная. Ближайшая ст. Крутоберегово находится в 87 км от эпицентра землетрясения, полигон Усть-Камчатский — в 91,5 км, ст. Ключи — примерно в 166 км, станции Оссора и Тигиль — примерно в 225 и 291,5 км соответственно. По сведениям Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН), косейсмические смещения ЮОЗ по временным рядам GPS-наблюдений не определялись, рассчитанные нами ожидаемые модельные смещения для этих станций составляют доли миллиметров.

## Оценка смещений земной поверхности методами РСА-интерферометрии

Спутниковую радарную интерферометрию сейчас можно уверенно назвать ключевым инструментом для анализа смещений и изменений напряжений, вызванных сильными земле-

трясениями в земной коре, особенно в отдалённых районах, где плохо развита сеть ГНСС (Глобальная навигационная спутниковая система) и сейсмических станций. Методы спутниковой геодезии, в том числе и спутниковые радиолокаторы с синтезированной апертурой (РСА), наряду с сейсмологическими исследованиями, вносят основной вклад в изучение сейсмических событий в районе п-ова Камчатка. Кроме того, изучение полей смещений в областях землетрясений даёт новую информацию о развитии современных тектонических процессов. Интерферометрическая спутниковая съёмка Камчатки регулярно осуществляется несколькими спутниковыми миссиями, использующими радиолокаторы различных диапазонов длин волн. Съёмка в среднем С-диапазоне (спутники Sentinel-1) и особенно в длинноволновом L-диапазоне (спутники ALOS-2, *англ.* Advanced Land Observing Satellite) является эффективным инструментом для оценки смещений на природных ландшафтах с большим количеством растительности, горным рельефом или снежным покровом. При благоприятных условиях точность вычисленных деформаций по снимкам радиолокаторами с меньшей длиной волны может оказаться выше. Поэтому сравнение результатов, полученных по снимкам различного диапазона длин волн, позволяет оценить надёжность получаемых результатов.

В данном исследовании была использована технология дифференциальной РСА-интерферометрии DInSAR (от *англ.* Differential interferometric synthetic aperture radar), которая уже более 25 лет успешно применяется в мире, в том числе для изучения землетрясений. Технология основана на сравнении фазы отражённых сигналов при съёмке первого и второго снимков. Если отражающие объекты на поверхности Земли меняют своё взаимное положение за время между двумя РСА-съёмками (как это происходит в случае землетрясения, проседания грунта, оползня и других процессов), то на интерферограмме, построенной по паре снимков, появляется новая аддитивная фазовая составляющая, не зависящая от пространственной базовой линии. В результате фазовый сдвиг содержит как составляющую, связанную с высотой отражающего объекта, так и компоненту, отражающую его смещения вдоль направления на спутник, называемого LOS (от *англ.* Line-of-Sight). Вычитая далее вклад высоты из интерферометрической фазы (создав так называемую дифференциальную интерферограмму), получаем оценку смещений на местности в направлении LOS, которая, естественно, осложнена различного рода помехами (Ferretti et al., 2007).

Для выявления возможных смещений на земной поверхности вследствие землетрясения нами были отобраны снимки спутниковой миссии Европейского космического агентства ESA (*англ.* European Space Agency) Sentinel-1A (длина волны 5,6 см), размещаемые в открытом доступе в центре данных Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>), а также снимки спутниковой миссии Японского агентства аэрокосмических исследований JAXA (*англ.* Japan Aerospace Exploration Agency) ALOS-2 (длина волны 22,9 см), размещаемые на сайте JAXA ([https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/url\\_change\\_info\\_e.htm](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/url_change_info_e.htm)) и предоставленные Институту физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) в рамках научного проекта ER2A2N075. На *рис. 1* (см. с. 146) показана область покрытия снимками спутниковых миссий Sentinel-1A и ALOS-2.

При расчётах использовались программные пакеты ENVI SARscape (коммерческий пакет, разработанный L3Harris (<https://www.l3harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI-SARscape#sarscape>)) и SNAP (*англ.* Sentinel Application Platform, открытый программный пакет, разработанный компаниями Brockmann Consult, Skywatch, Sensar и C-S (<https://earth.esa.int/eogateway/tools/snap>) по заказу ESA) со встроенным плагином развёртки фазы SNAPHU.

Были проанализированы все возможные пары изображений, охватывающие исследуемое сейсмическое событие. Из 47 проанализированных пар снимков со спутника Sentinel-1A единственная парная интерферограмма, показавшая смещения на земной поверхности, получена по снимкам от 17 и 29 марта 2017 г., которые покрывают событие с минимальным интервалом по времени (*рис. 2*, см. с. 146). Все остальные построенные интерферограммы не выявили смещений из-за потери когерентности. Важно отметить, что снимок от 29 марта 2017 г. сделан через 15 ч после землетрясения. Максимальные смещения в проекции на линию визирования спутника достигали 13 см. Близкий результат (15 см) также был получен в работе (Vassileva et al., 2020).

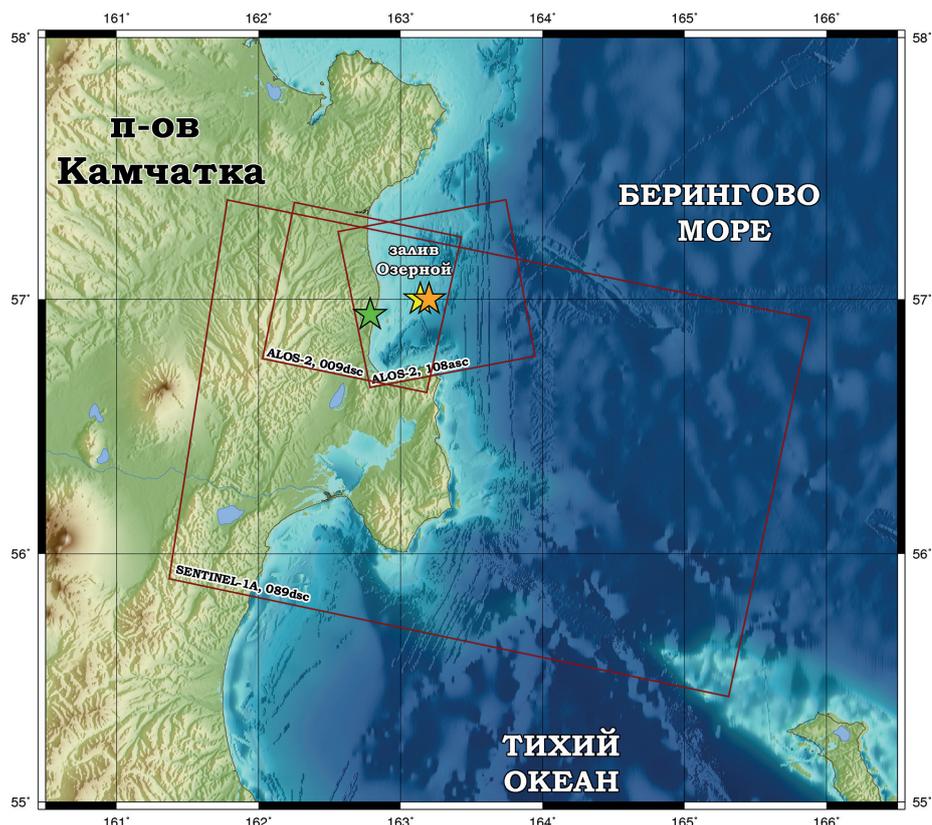


Рис. 1. \* Область покрытия района ЮОЗ снимками с 89-го трека нисходящей орбиты спутника Sentinel-1A, а также снимками 9-го трека нисходящей орбиты и 108-го трека восходящей орбиты спутника ALOS-2. Зелёная звезда — эпицентр ЮОЗ по данным NEIC, жёлтая — по данным GCMT, оранжевая — по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН

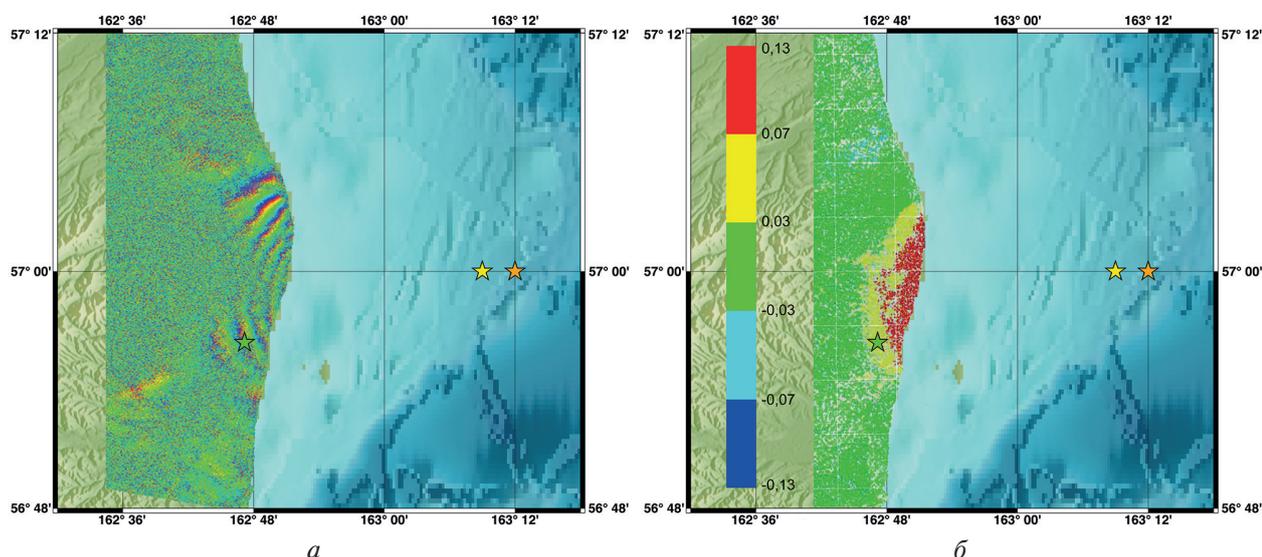


Рис. 2. Оценка смещений в результате ЮОЗ по паре снимков спутника Sentinel-1A от 17.03.2017 и 29.03.2017 (89-й трек нисходящей орбиты): а — дифференциальная интерферограмма (неразвёрнутая фаза в радианах); б — смещение на земной поверхности после развёртки фазы (в метрах). Красным и жёлтым цветом обозначаются положительные смещения (в направлении на спутник), синим и голубым — отрицательные (в направлении от спутника). Обозначения эпицентров аналогичны рис. 1

\* Здесь и далее в статье карты построены с использованием программного комплекса Generic Mapping Tools (GMT) (Wessel et al., 2013). Для построения рельефа использовались данные General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (Weatherall et al., 2015).

По снимкам со спутника ALOS-2, который оборудован радиолокатором с существенно бóльшей длиной волны, были построены две парные интерферограммы. Снимки L-диапазона сохраняют когерентность на длительных интервалах времени. Они менее чувствительны к атмосферным помехам и влиянию снежного покрова. Интерферограммы как с нисходящей, так и с восходящей орбиты определили смещения в направлении на спутник, причём намного бóльшие, чем по снимкам Sentinel-1A.

Построенная нами интерферограмма по снимкам с 9-го трека нисходящей орбиты спутника ALOS-2 (06.03.2017–01.05.2017) показала смещения бóльшие, чем представленные в работе (Vassileva et al., 2020). Дополнительно нами были обработаны снимки со 108-го трека восходящей орбиты (ALOS-2) за летний период (30.07.2016–29.07.2017). Эти данные ещё не использовались для исследования ЮОЗ (рис. 3).

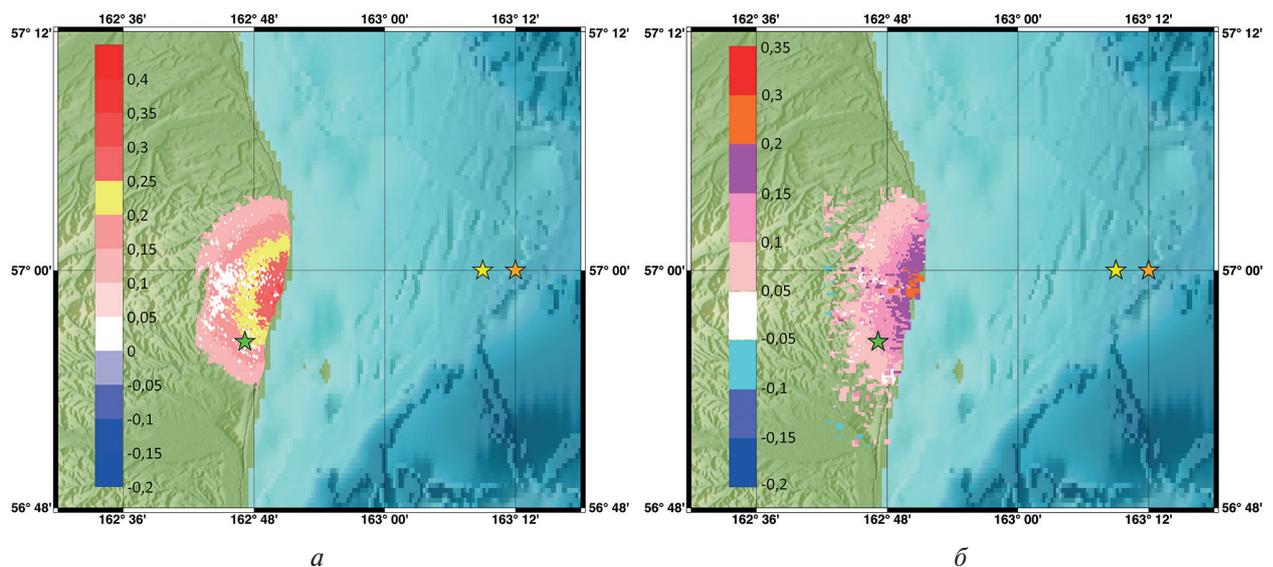


Рис. 3. Поля смещений по данным ALOS-2 (в метрах): *а* — по снимкам 108-го трека восходящей орбиты от 30.07.2016 и 29.07.2017; *б* — по снимкам 9-го трека нисходящей орбиты от 06.03.2017 и 01.05.2017. Обозначения эпицентров аналогичны рис. 1 и 2

Максимальное смещение в направлении LOS по снимкам ALOS-2 с нисходящего 9-го трека равно 24,7 см (19 см в работе (Vassileva et al., 2020)), с восходящего 108-го трека — 33,1 см. По снимкам спутника Sentinel-1A с нисходящего 89-го трека смещения существенно меньше — всего 13 см. Учитывая близость геометрии съёмки обоих спутников, такого существенного расхождения в значениях быть не должно. Судя по всему, отражения коротковолнового сигнала спутника Sentinel-1A получены не от земной поверхности, которая, безусловно, сместилась, а представляют собой либо рефракцию в слое снега, либо отражения от твёрдого наста, который был нарушен в результате землетрясения. Принимая во внимание, что многочисленные пары Sentinel-1A не выявили никаких смещений, далее смещения по паре снимков Sentinel-1A 17.03.2017–29.03.2017 будут использоваться только для сравнения.

Поскольку обе пары снимков ALOS-2 захватывают весь афтершоковый период, можно предположить, что расхождения в полях смещений для двух пар снимков связаны с различной геометрией съёмки с нисходящего и восходящего треков. Положительными принято считать смещения к спутнику, поэтому вертикальные смещения всегда входят в смещения на спутник со знаком плюс, а смещения на восток — со знаком плюс при съёмке с нисходящего трека и со знаком минус с восходящего трека. В нашем случае надвиговые смещения во время землетрясения произошли вдоль поверхности с простираем примерно север — юг. Следовательно, независимо от угла падения этой поверхности, горизонтальные смещения на суше, расположенной западнее поверхности разрыва, должны были произойти в восточном направлении, поэтому смещения в направлении на спутник на нисходящем треке должны быть

несколько больше смещений на спутник на восходящем треке. Парные интерферограммы показали противоположный результат: смещения, зарегистрированные по летним снимкам с восходящего трека, больше, чем смещения, полученные с участием зимнего снимка с нисходящего трека. Мы считаем, что это связано с влиянием снежного покрова в марте 2017 г. Поскольку расхождения в полях не слишком велики, нами было принято решение строить модель поверхности разрыва по данным с обоих треков спутника ALOS-2.

### Построение моделей поверхности разрыва на основе данных РСА-интерферометрии

Аппроксимируем поверхность сейсмического разрыва набором прямоугольных площадок. Для расчёта смещений на земной поверхности применим аналитическое решение задачи о деформациях радиально расслоённой сферической планеты в результате смещений по падению и простираанию на расположенной в ней прямоугольной площадке, полученное Ф. Ф. Поллитцем (Pollitz, 1996, 1997).

По данным NEIC, параметры нодальных плоскостей следующие (простираание, падение, угол подвижки): 208°, 39°, 92° и 25°, 51°, 88°; сейсмический момент —  $9 \cdot 10^{18}$  Н·м. В каталоге GCMT приводятся следующие величины: 217°, 51°, 102° и 19°, 41°, 76°; сейсмический момент —  $10^{19}$  Н·м.

Полученное в работе (Vassileva et al., 2020) решение близко к первой нодальной плоскости (угол простираания 213°), однако выбран очень крутой угол падения — 72°, что представляется слишком большим значением для надвига и не соответствует данным сейсмологии. В случае надвига угол должен быть более пологим.

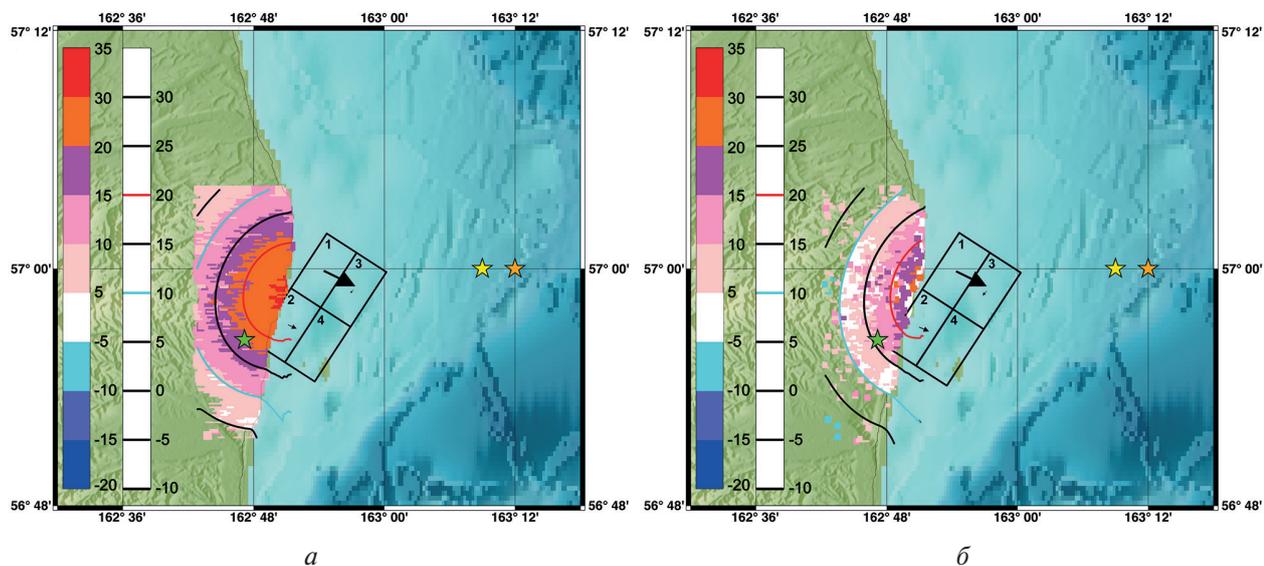


Рис. 4. Результаты подбора моделью с одной плоскостью, разделённой на четыре равных элемента, с условием, что вектор подвижки близок к GCMT-решению (102°): а — сравнение результатов со смещениями на восходящем треке ALOS-2; б — то же для нисходящего трека ALOS-2. Смещения на верхних элементах (обозначены цифрами 3 и 4) поверхности близки к нулю. Прямоугольник — проекция плоскости на дневную поверхность; цветная шкала — исходные смещения в направлении LOS (см); изолинии — поле смещений по модели, также в направлении LOS соответствующего спутника; стрелки — направление смещений на верхней поверхности разрыва. Обозначения эпицентров аналогичны рис. 1–3

Перейдём к результатам нашего моделирования. Примем глубину нижней кромки равной 12,43 км, верхней — 3,8 км (аналогично исследованию (Vassileva et al., 2020)), угол падения — 51° (USGS), координаты центра плоскости — 56,9654° с. ш., 162,9° в. д., длину по простира-

нию — 12,9 км, по падению — 9,1 км. Нами была выполнена большая серия расчётов с различным углом падения поверхности разрыва и различными углами простирания. Наилучший результат получен для поверхности, разделённой на четыре равных элемента: два — по простиранию и два — по падению, с углом простирания  $213^\circ$ , т.е. плоскость наклонена на северо-запад. Решение строилось под поля смещений, полученные по снимкам с восходящей и нисходящей орбит спутника ALOS-2. Дополнительно введено условие регуляризации о том, что угол подвижки близок к значению, заданному по сейсмологии (Михайлов и др., 2019, 2022; Diament et al., 2020) и равному  $102^\circ$  (первая нодальная плоскость по данным GCMТ). В таблице приведены полученные рассчитанные значения. Сейсмический момент равен  $6,6 \cdot 10^{18}$  Н·м, среднеквадратическая невязка подбора — 2,9 см. Визуализация результатов показана на рис. 4 (см. с. 148).

Рассчитанные по модели значения смещений на поверхности разрыва

№ элемента	Надвиговая компонента, м	Сдвиговая компонента, м	Суммарное смещение, м	Угол подвижки, град
1	4,88	-0,58	4,91	96,8
2	1,52	-0,25	1,54	99,3
3	-0,15	0,84	0,85	-10,1
4	-0,08	0,05	0,09	-58,0

## Обсуждение результатов

Для ЮОЗ нам удалось построить наиболее детальную дифференциальную интерферограмму по снимкам спутника ALOS-2 со 108-го трека восходящей орбиты. Эта интерферограмма получена впервые и подробно характеризует поле смещений.

Следует отметить, что для исследования использованы в основном летние снимки ALOS-2, взят только один снимок за март. Это позволяет быть уверенными в снижении влияния снежного покрова на качество интерферограммы. При этом смещения по снимкам ALOS-2 согласуются между собой, что показывает возможность использования с определённой осторожностью «зимних» снимков ALOS-2 для Камчатки.

В то же время поле смещений, полученное по снимкам спутника Sentinel-1A, имеет в два с лишним раза меньшую амплитуду. Важно, что ни один соседний по времени снимок, а также летние снимки не показали смещений земной поверхности. Средневолновые снимки спутника Sentinel-1A более чувствительны к влиянию снежного покрова и растительности, чем снимки спутника ALOS-2. Основным показателем, контролирующим влияние помех, выступает когерентность снимков.

Построена модель поверхности разрыва с заданными начальными параметрами и условием близости угла подвижки к данным GCMТ-решения. Решение даёт оценку сейсмического момента, близкую к сейсмологическим данным. Исходя из результатов моделирования, угол падения поверхности разрыва равен  $51^\circ$ , что существенно отличается от крутого падения ( $72^\circ$ ) в модели (Vassileva et al., 2020).

Кроме того, проанализировано утверждение авторов работы (Чебров и др., 2017) о том, что эпицентр ЮОЗ располагался северо-восточнее, чем это представлено в каталоге NEIC. В этом случае аппроксимирующая плоскость должна быть сдвинута на восток, но тогда существенно возрастёт ошибка подбора и амплитуда смещений, т.е. не будет совпадения по сейсмическому моменту. Ширина поля смещений также не позволяет сильно сдвигать модель на восток. Отсюда заключаем, что разрыв произошёл ближе к берегу.

Подвижка в очаге по данным моделирования, как и по данным сейсмологии, — это пологий ( $51^\circ$ ) надвиг с небольшой правосторонней сдвиговой компонентой. Смещения в очагах предыдущих землетрясений, эпицентры которых расположены восточнее, предположительно,

были почти чистым сдвигом на близвертикальных разрывах. Такое расхождение указывает на то, что, возможно, разрыв ЮОЗ произошёл на иной системе разломов, связанной с береговыми горными хребтами.

Исследование выполнено по госзаданию ИФЗ РАН, а также при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки Российской Федерации № 14.W03.31.0033 «Геофизические исследования, мониторинг и прогноз развития катастрофических геодинамических процессов на Дальнем Востоке РФ».

Авторы благодарят Европейское космическое агентство (ESA) за возможность использования снимков со спутника Sentinel-1A, а также Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) за снимки, предоставленные в рамках научного проекта ER2A2N075. Авторы также выражают благодарность анонимному рецензенту, замечания которого позволили внести в статью важные уточнения.

## Литература

1. 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. DOI: 10.7868/S0002333715030035.
2. Михайлов В. О., Тимошкина Е. П., Киселева Е. А., Хайретдинов С. А., Дмитриев П. Н., Карташов И. М., Смирнов В. Б. Проблемы совместной интерпретации временных вариаций гравитационного поля с данными о смещениях земной поверхности и дна океана на примере землетрясения Тохоку-Оки (11 марта 2011 г.) // *Физика Земли*. 2019. № 5. С. 53–60. DOI: 10.31857/S0002-33372019553-60.
3. Михайлов В. О., Тимофеева В. А., Смирнов В. Б., Тимошкина Е. П., Шапиро Н. М. Новая модель поверхности разрыва Ближне-Алеутского землетрясения 17.07.2017 г.  $M_w = 7.8$  на основе данных спутниковой радарной интерферометрии // *Физика Земли*. 2022. № 2. С. 88–101. DOI: 10.31857/S0002333722020089.
4. Федотов С. А., Гусев А. А., Зобин В. М., Кондратенко А. М., Чепкунас К. Е. Озерновское землетрясение и цунами 22(23) ноября 1969 г. // *Землетрясения в СССР в 1969 г.* / отв. ред. Введенская Н. А., Кондорская Н. В., Шебалин Н. В. М.: Наука, 1973. С. 195–208.
5. Чебров Д. В., Кугаенко Ю. А., Ландер А. В., Абубакиров И. Р., Воропаев П. В., Гусев А. А., Дрознин Д. В., Дрознина С. Я., Иванова Е. И., Кравченко Н. М., Матвеев Е. А., Митюшкина С. В., Ототюк Д. А., Павлов В. М., Раевская А. А., Салтыков В. А., Сенюков С. Л., Скоркина А. А., Серафимова Ю. К. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. с  $M_w = 6.6$ ,  $K_s = 15.0$ ,  $I = 6$  (Камчатка) // *Вестн. Камчатской регион. ассоциации «Учебно-науч. центр»*. Сер.: Науки о Земле. 2017. № 3. Вып. 35. С. 7–21.
6. Diament M., Mikhailov V., Timoshkina E. Joint inversion of GPS and high-resolution GRACE gravity data for the 2012 Wharton basin earthquakes // *J. Geodynamics*. 2020. V. 136. 11 p. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101722>.
7. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F. InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation / ESA TM. V. 19. Esa, 2007. 246 p.
8. Pollitz F. F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophysical J. Intern.* 1996. V. 125. Iss. 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>.
9. Pollitz F. F. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth // *J. Geophysical Research: Solid Earth*. 1997. V. 102. Iss. B8. P. 17921–17941. <https://doi.org/10.1029/97JB01277>.
10. Vassileva M. S., Motagh M., Walter T. R., Wetzel H.-U., Senyukov S. L. The 29 March 2017 Yuzhno-Ozerovskoe Kamchatka Earthquake: Fault Activity in an Extension of the East Kamchatka Fault Zone as Constrained by InSAR Observations // *Bull. Seismological Society of America*. 2020. No. 110. Iss. 3. P. 1101–1114. <https://doi.org/10.1785/0120190174>.
11. Weatherall P., Marks K. M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J. E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R. A new digital bathymetric model of the world's oceans // *Earth and Space Science*. 2015. V. 2. Iss. 8. P. 331–345. <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>.
12. Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F. Generic Mapping Tools: Improved Version Released // *EOS, Trans. American Geophysical Union*. 2013. V. 94. Iss. 45. P. 409–410. <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>.

## Model of the rupture surface of the March 29, 2017, South-Ozernoy earthquake from satellite radar interferometry data

V. O. Mikhailov<sup>1,2</sup>, V. A. Timofeeva<sup>1</sup>, M. S. Volkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia*  
E-mail: v.a.timofeeva@iperas.ru

<sup>2</sup> *Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

On March 29, 2017 at 04:09:24 GMT (16:09:24 local time), an earthquake with a magnitude of  $M_w = 6.6$  occurred in the western Bering Sea. Data on the parameters of the earthquake of different world seismological centers vary. According to NEIC, the epicenter of the earthquake is located 81 km from the Ust-Kamchatsk village (56.940N, 162.786E). The Global CMT catalog contains other coordinates of the epicenter — 57.00N, 163.15E. According to the data of the Kamchatka Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey RAS” (Chebrov et al., 2017), the earthquake hypocenter was located approximately 90 km northeast of Ust-Kamchatsk at a depth of ~43 km and had coordinates 57.0N, 163.2E, i.e. the epicentral area outlined by aftershocks was located in the southern part of the Ozernoy Bay, on the basis of which this earthquake was called the South-Ozernoy earthquake (SOE). Determining the coseismic displacements of the SOE from the data of the permanent sites of the Global Navigation Satellite System (GNSS) turned out to be impossible due to their sparseness and remoteness from the epicenter of the event. It was also not possible to determine the parameters of the rupture surface using the waveform analysis, due to the small magnitude of the event and its remoteness from the stations of the world seismological network. Therefore, the satellite radar interferometry has become almost the only way to determine displacements on the earth’s surface and create a model of the rupture surface. Also, the displacement fields of the earth’s surface can be used to clarify the location of the earthquake hypocenter. We constructed and processed 50 interferometric pairs: from the descending orbit of track 89 of images of Sentinel-1A satellite, as well as pairs of ALOS-2 images from the descending orbit of track 9 and ascending orbit of track 108. The images were mostly selected for the summer period, in order to eliminate the effect of snow cover. Pairs of ALOS-2 images showed displacement fields in the Line-of-Sight (LOS) direction up to 33 cm. The rupture surface parameters are: strike — 213°, depth of the upper edge — 3.8 km, length along the strike — 12.9 km, along the dip — 9.1 km. The amplitude of average displacement is about 1.85 m.

**Keywords:** South-Ozernoy earthquake, rupture surface model, satellite radar interferometry, remote sensing from space, differential SAR interferometry

Accepted: 30.06.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-143-152

### References

1. Gordeev E. I., Pinegina T. K., Kozhurin A. I., Lander A. V., Beringia: Seismic hazard and fundamental problems of geotectonics, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2015, No. 4, pp. 512–521, DOI: 10.1134/S1069351315030039.
2. Mikhailov V. O., Timoshkina E. P., Kiseleva E. A., Khairtdinov S. A., Dmitriev P. N., Kartashov I. M., Smirnov V. B., Problems of the joint inversion of temporal gravity variations with the data on land and sea-floor displacements: a case study of the Tohoku-Oki earthquake of March 11, 2011, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2019, No. 5, pp. 746–752, DOI: 10.1134/S1069351319050070.
3. Mikhailov V. O., Timofeeva V. A., Smirnov V. B., Timoshkina E. P., Shapiro N. M., New Model of the Rupture Surface of the Near Islands Aleutian Earthquake of July 17, 2017  $M_w = 7.8$  Based on SAR Interferometry, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2022, No. 2, pp. 88–101, DOI: 10.31857/S0002333722020089 (in Russian).
4. Fedotov S. A., Gusev A. A., Zobin V. M., Kondratenko A. M., Chepkunas K. E., Ozernovskoe earthquake and tsunami on November 22(23), 1969, *Zemletryaseniya v SSSR v 1969 g.* (Earthquakes in the USSR in 1969), Vvedenskaya N. A., Kondorskaya N. V., Shebalin N. V. (eds.), Moscow: Nauka, 1973, pp. 195–208 (in Russian).
5. Chebrov D. V., Kugaenko Yu. A., Lander A. V., Abubakirov I. R., Voropaev P. V., Gusev A. A., Droznin D. V., Droznina S. Ya., Ivanova E. I., Kravchenko N. M., Matveenkov E. A., Mityushkina S. V., Ototyuk D. A.,

- Pavlov V. M., Raevskaya A. A., Saltykov V. A., Senyukov S. L., Skorkina A. A., Serafimova Yu. K., South-Ozernoy earthquake on March 29, 2017 with  $M_w = 6.6$ ,  $K_s = 15.0$ ,  $I = 6$  (Kamchatka), *Vestnik Kamchatskoi regional'noi assotsiatsii "Uchebno-nauchnyi tsentr"*, Ser.: *Nauki o Zemle*, 2017, No. 3, Vyp. 35, pp. 7–21 (in Russian).
6. Diament M., Mikhailov V., Timoshkina E., Joint inversion of GPS and high-resolution GRACE gravity data for the 2012 Wharton basin earthquakes, *J. Geodynamics*, 2020, Vol. 136, 11 p., DOI: 10.1016/j.jog.2020.101722.
  7. Ferretti A., Monti-Guarnieri A., Prati C., Rocca F., *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA TM, Vol. 19, Esa, 2007, 246 p.
  8. Pollitz F. F., Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth, *Geophysical J. Intern.*, 1996, Vol. 125, Issue 1, pp. 1–14, <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>.
  9. Pollitz F. F., Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 1997, Vol. 102, Issue B8, pp. 17921–17941, <https://doi.org/10.1029/97JB01277>.
  10. Vassileva M. S., Motagh M., Walter T. R., Wetzell H.-U., Senyukov S. L., The 29 March 2017 Yuzhno-Ozernovskoe Kamchatka Earthquake: Fault Activity in an Extension of the East Kamchatka Fault Zone as Constrained by InSAR Observations, *Bull. Seismological Society of America*, 2020, No. 110, Issue 3, pp. 1101–1114, <https://doi.org/10.1785/0120190174>.
  11. Weatherall P., Marks K. M., Jakobsson M., Schmitt T., Tani S., Arndt J. E., Rovere M., Chayes D., Ferrini V., Wigley R., A new digital bathymetric model of the world's oceans, *Earth and Space Science*, 2015, Vol. 2, Issue 8, pp. 331–345, <https://doi.org/10.1002/2015EA000107>.
  12. Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J., Wobbe F., Generic Mapping Tools: Improved Version Released, *EOS, Trans. American Geophysical Union*, 2013, Vol. 94, Issue 45, pp. 409–410, <https://doi.org/10.1002/2013EO450001>.