

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ШИПУНСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 17.08.2024 НА КАМЧАТКЕ

© 2025 А.М. Конвисар^{1,2}, Е.П. Тимошкина¹, Н.Н. Титков²,
В.О. Михайлов¹, М.С. Волкова¹, В.Б. Смирнов^{1,3}, Д.В. Чебров²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, Россия, 123242;
e-mail: alexkonvisar@gmail.com

²Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН»,
Петропавловск-Камчатский, Россия, 683006

³Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия, 119991

Поступила в редакцию 23.11.2024; после доработки 19.05.2025; принята в печать 25.03.2025.

В работе представлена модель поверхности разрыва Шипунского землетрясения, построенная с использованием данных ГНСС. Модель состоит из одной плоскости с углом падения 30° , простираемой в 211° и глубинами верхней и нижней кромок 25 и 49 км соответственно. По сравнению с решением, представленном на сайте USGS, поверхность разрыва сдвинута ближе к океаническому желобу, и имеет длину по падению большую, чем по простираанию, что лучше соответствует положению облака афтершоков по данным Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». По плоскости разрыва произошел почти чистый надвиг, максимальное смещение составило 0.88 м при среднем смещении 0.79 м. Такие смещения соответствуют сейсмическому моменту 2.9×10^{19} Н·м ($M_w = 6.9$). Полученная модель хорошо согласуется как с горизонтальными, так и с вертикальными смещениями GPS станций. Модель позволила рассчитать теоретические поля смещений земной поверхности в направлении на спутник. Выполнено качественное сравнение этих смещений со смещениями по радарным снимкам спутника Сентинель-1А.

Ключевые слова: Шипунское землетрясение 17.08.2024, ГНСС, РСА-интерферометрия, модель поверхности разрыва.

ВВЕДЕНИЕ

Курило-Камчатская зона субдукции (ККЗС) простирается примерно на 2200 км от острова Хоккайдо, на юге, вдоль Курильских островов и восточного побережья Камчатки до пересечения с Алеутской дугой. В этой зоне Тихоокеанская литосферная плита погружается под Охотоморскую плиту со средней скоростью 8–9 см/год (Argus et al., 2011). Такая скорость конвергенции делает эту область одним из самых сейсмоактивных регионов земного шара. С 1900 г. по 2018 г. в ККЗС произошло 13 землетрясений с моментной магнитудой $M_w \geq 8.0$ (Bilek, Lay, 2018), в том числе Большое Камчатское Землетрясение 4 ноября 1952 г. с $M 9.0$ (Båth, Benioff, 1958; MacInnes et al., 2010), которое до сих пор остается пятым по величине зарегистрированным землетрясением.

Произошедшее 17 августа 2024 г. землетрясение в районе мыса Шипунский, названное Шипунским, имело умеренную магнитуду $M_w = 7.0$. Однако по данным регионального Каталога землетрясений Камчатки и Командорских островов (<http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>) это землетрясение стало вторым, после землетрясения 5 декабря 1997 г., $ML = 7.0$, $M_w = 7.8$, сильнейшим мелкофокусным ($0 \leq h \leq 70$ км) событием Камчатской сейсмофокальной зоны с начала детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 1961 г. В каталоге Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) координаты гипоцентра указаны как 52.776° с.ш. 160.402° в.д., глубина 43.3 км. Геологическая служба США (USGS) (<https://earthquake.usgs.gov/>)

определила координаты гипоцентра как 52.931° с.ш. 160.133° в.д., с глубиной 29 км, и нодальные плоскости NP1 213°, 25°, 82°; NP2 42°, 65°, 94° (простираение, падение, угол подвижки). Сейсмический момент = 4.203×10^{19} Н·м ($M_w = 7.02$). Также механизм очага данного землетрясения представлен в Гарвардском каталоге GCMT (<https://www.globalcmt.org/>): NP1 216°, 27°, 89°; NP2 37°, 63°, 91°, координаты гипоцентра 52.79° с.ш. 160.25° в.д., глубина 45.7 км, а сейсмический момент 4.24×10^{19} Н·м ($M_w = 7.0$).

Оценки координат и глубины гипоцентра в разных каталогах существенно отличаются. Чтобы уточнить положение сейсмического разрыва и определить поле смещений на нем, нами с применением данных спутниковой геодезии построена модель поверхности разрыва Шипунского землетрясения. Необычным является процесс развития сейсмичности в период Шипунского землетрясения. Все это делает актуальным изучение этого сейсмического события, расположенного всего в ста километрах восточнее г. Петропавловска-Камчатского.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Данные спутниковой интерферометрии. Спутниковая радарная интерферометрия позволяет с высокой точностью определять поля смещений земной поверхности за период времени между повторными снимками. Радиолокатор, оснащенный антенной с синтезированной апертурой (РСА, в английской литературе SAR), посылает электромагнитные импульсы под некоторым углом к вертикали и получает отраженный сигнал, который характеризуется амплитудой и фазовым сдвигом относительно сигнала, излученного антенной. Анализ фазового сдвига отраженных сигналов двух последовательных снимков позволяет оценивать смещения отражающих объектов за время между съемками (Hanssen, 2001). Спутник проводит съемку независимо от времени суток и погодных условий, однако атмосферные процессы, особенно турбулентность и осадки в ее нижних слоях, искажают радарный сигнал, снижая качество получаемых результатов. Кроме того, поскольку сигнал излучается спутником под углом к вертикали, методы РСА-интерферометрии показывают смещения в направлении на спутник (LOS — line of sight), которые являются суммой смещений по вертикали, на восток и на север, умноженных на синусы и косинусы угла наклона зондирующего луча и азимута полета спутника. Отметим также, что съемку одной и той же территории спутник проводит, двигаясь с юга на север (восходящая орбита) и с севера на юг (нисходящая орбита). В результате появляется возможность получить

поля смещений для двух различных геометрий съемки.

В настоящей работе для оценки полей смещений земной поверхности нами использованы две пары снимков, полученные спутником Европейского Космического Агентства (ЕКА) Сентинель-1А (С — диапазон с длиной волны 5.6 см) от 05.08 и 17.08.2024 и от 04.08 и 09.09.2024 с нисходящей и восходящей орбит соответственно. Оценка полей смещений производилась методом парной интерферометрии, называемой также DInSAR (от англ. Differential InSAR), для интерферометрической обработки снимков использованы пакеты SNAP, разработанный ЕКА, коммерческий пакет SARscape, а также сервис ASF HyP3 (Alaska Satellite Facility's Hybrid Pluggable Processing Pipeline) (<https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/>). Анализ полей смещений, полученных с двух орбит, будет представлен далее.

Данные ГНСС. На п-ове Камчатка развернута обширная региональная сеть постоянных станций Глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), предоставляющая возможность исследования деформаций земной поверхности на всех стадиях сейсмического цикла. Обработка ГНСС наблюдений выполнялась программным пакетом GAMIT/GLOBK (Herring et al., 2018). Учитывались деформации, создаваемые океаническими приливами и связанными с ними атмосферными процессами (модель FES2004), а также неприливными изменениями давления в атмосфере по модели VMF1. Переменная тропосферная задержка оценивалась по табличной тропосферной функции VMF1. Ежесуточные смещения ГНСС (GPS) пунктов посчитаны в условной системе координат. За начальные априорные координаты брались средние на промежутке 40 дней для опорных пунктов сети IGS, а для пунктов Камчатской сети по паре координат, как средние на промежутках 20 дней до и после землетрясения. Скорости смещений пунктов не оценивались. Для уточнения априорных координат выполнялось уравнивание сети с последующей переобработкой с более строгими ограничениями уравнивания. Косейсмические смещения определены как разность средних значений пяти суточных отсчетов до и после землетрясения. Отсчет от 17.08.2024, выполненный в период землетрясения, не использовался. Косейсмические смещения выше уровня шумов в результате Шипунского землетрясения зарегистрировали 18 станций ГНСС (таблица). Однако, поскольку расстояние между пунктами ARSN, PETS, PETT, PETR, PPK1, PPK2 и PPK3 мало, по сравнению с расстояниями до других пунктов, из них были оставлены данные только пункта PETR, которые имеют минимальные погрешности. Таким образом, для решения обратной

Косейсмические смещения станций Камчатской сети КФ ФИЦ ЕГС РАН
Coseismic displacements of stations in the Kamchatka network of the KB GS RAS

Пункт	Координаты		Смещения			Ошибки		
	Широта	Долгота	E, мм	N, мм	U, мм	Se, мм	Sn, мм	Su, мм
APC1 ¹	52.9257	157.1330	3.53	-2.10	2.92	0.47	0.51	1.04
ARSN ²	53.0659	158.5887	13.45	-5.08	-1.13	0.78	0.33	0.72
AVCH ¹	53.2643	158.7397	13.25	-8.10	-2.85	0.43	0.34	0.77
KMSH ¹	52.8266	158.1312	5.93	-0.65	-3.24	2.38	1.09	1.79
KRC1 ²	53.2833	158.2118	8.91	-4.36	-2.56	0.41	0.37	1.40
KZLS ¹	53.2017	158.8991	16.74	-9.48	-6.55	0.83	0.49	0.75
MIL4 ²	54.6953	158.6209	2.24	-3.32	0.32	0.42	0.49	0.44
MYAK1	52.8891	158.7072	14.06	-2.58	-2.22	0.62	0.62	0.56
PETR ¹	53.0668	158.6070	13.54	-5.69	-3.67	0.35	0.26	0.41
PETS ¹	53.0233	158.6501	14.21	-4.45	-1.50	0.53	0.40	0.54
PETT ³	53.0805	158.6402	13.64	-4.81	-3.55	0.40	0.38	0.84
PPK1 ⁴	53.0806	158.6400	14.60	-5.79	-2.53	0.42	0.41	0.46
PPK2 ⁴	53.0802	158.6402	14.28	-4.76	-2.87	0.56	0.42	1.07
PPK3 ⁴	53.0804	158.6402	14.31	-4.95	-4.36	0.40	0.39	0.45
RADZ ¹	53.0737	158.9862	18.74	-9.22	-7.13	0.58	0.61	0.62
SPNS ¹	53.1056	160.0111	10.86	-8.10	-2.32	0.37	0.62	0.55
TERM ²	52.9339	158.2267	7.98	-1.09	-2.26	0.79	0.31	0.67
UBR3 ²	52.8239	156.2807	1.98	-1.21	0.08	0.61	0.36	0.44

Примечание. Индексами в первом столбце обозначены: 1 — сеть КФ ФИЦ ЕГС РАН; 2 — сеть Системы высокоточного позиционирования (СВТП) Камчатского края; 3 — пункт ФАГС ФГУП «ВНИИФТРИ»; 4 — сеть Системы Дифференциальной Коррекции и Мониторинга (СДКМ) АО Российские космические системы, S — среднеквадратическая погрешность.

Note. Indices in the first column indicate: 1 — Network of the Kamchatka Branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of RAS» (KB GS RAS); 2 — Network of the High-Precision Positioning System (HPPS) of the Kamchatka Territory; 3 — FAGS station of FSUE «VNIIFTRI»; 4 — System for Differential Corrections and Monitoring (SDCM) of JSC «Russian Space Systems»; S — root mean square error.

задачи использовались данные о смещениях 12 пунктов GPS в районе землетрясения (рис. 1). Максимальные смещения зарегистрированы на станции RADZ, на берегу Авачинского залива (рис. 1), и составили почти 21 мм по горизонтали и 7 мм по вертикали.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Прежде всего следует отметить, что за 17 часов до Шипунского землетрясения произошло небольшое глубокое сейсмическое событие магнитудой 5.2. По данным USGS координаты гипоцентра составили 53.570° с.ш. 158.156° в.д., глубина 173.1 км. Нодальные плоскости: NP1

21°, 72°, -66° и NP2 145°, 30°, -142°. Эти параметры соответствуют сбросу с существенной сдвиговой компонентой, вероятнее всего на поверхности, секущей погружающуюся плиту, т.е. с простирающим 21°. Такое событие могло создать обстановку растяжения в верхней части плиты и инициировать Шипунское землетрясение.

Необычной является геометрия облака ранних афтершоков. В вертикальном сечении афтершоки делятся на две группы по глубине (рис. 2б). Афтершоки с меньшей глубиной (группа А) постепенно смещаются в направлении к океаническому желобу (рис. 2а). Вторая группа (Б), в которую входят более интенсивные и глубокие сейсмические события, продвигается вдоль простирающей погружающейся плиты. Ветвь А

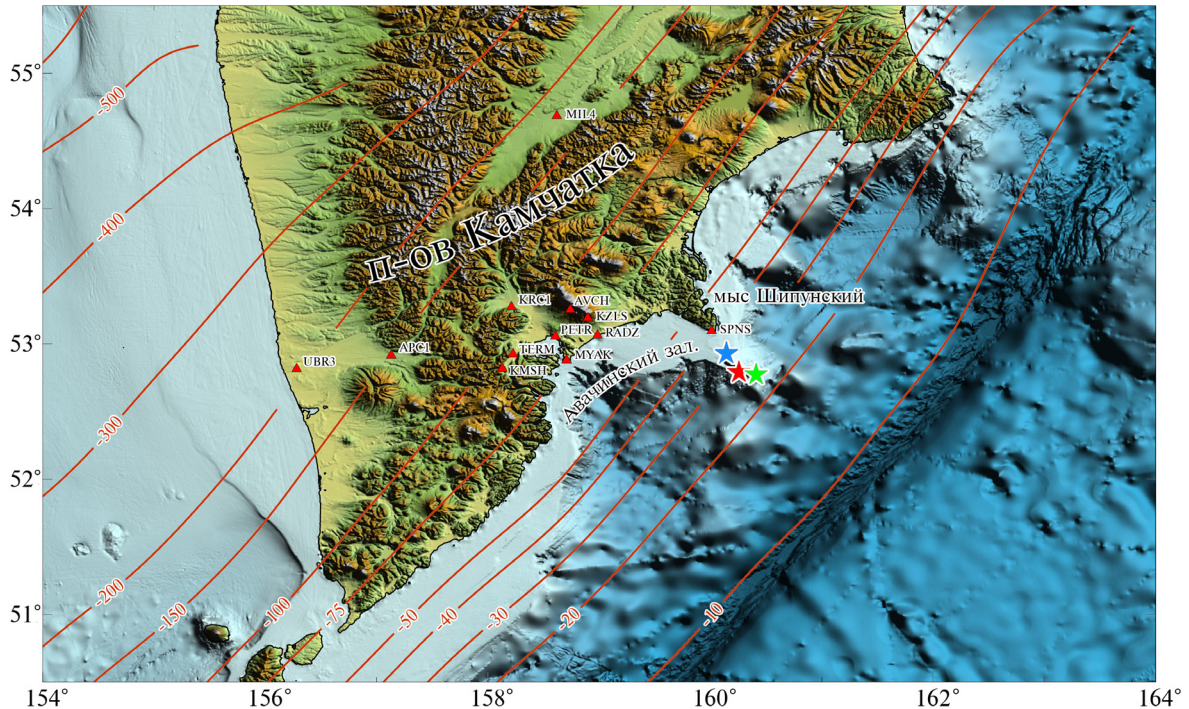


Рис. 1. Обзорная карта района Шипунского землетрясения. Красными треугольниками обозначены пункты GPS сети, данные о смещениях которых использованы в работе (таблица). Зеленая звезда — эпицентр землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН с глубиной 43.3 км; синяя — эпицентр по USGS с глубиной 29 км; красная — эпицентр по GCMT с глубиной 45.7 км. Изолиниями показана глубина поверхности погружающейся плиты (км) по модели Slab2 (Hayes et al., 2018). Рельеф построен по модели SRTM (<https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>), карта океанического дна — по батиметрии GEBCO (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

Fig. 1. Overview map of the Shipunski earthquake region. Red triangles indicate the GPS network stations whose displacement data were used in the study (table). The green star marks the earthquake epicenter according to the KB GS RAS at a depth of 43.3 km; the blue star shows the epicenter according to USGS at a depth of 29 km; and the red star indicates the epicenter according to GCMT at a depth of 45.7 km. Contour lines represent the depth of the subducting plate's surface (km) based on the Slab2 model (Hayes et al., 2018). The terrain relief is derived from the SRTM model (<https://csidotinfo.wordpress.com/data/srtm-90m-digital-elevation-database-v4-1/>), and the ocean floor map is based on GEBCO bathymetry (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/).

распадается на две цепочки: одна с постоянной глубиной, другая — с глубиной, уменьшающейся по мере удаления от главного события. Глубины событий в ветви Б имеют большой разброс, хотя, в целом, их глубина увеличивается в сторону континента.

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ РАЗРЫВА

Точность оценки полей смещений на земной поверхности по двум спутниковым радарным снимкам (метод DInSAR), как правило, находится в пределах первых сантиметров, а влияние атмосферных эффектов может существенно искажать картину в целом, особенно в горной местности (Ferretti, 2014). По нашему мнению, в случае Шипунского землетрясения смещения на суше должны давать сигнал на уровне погрешностей DInSAR метода. Исходя из этого, мы построили модель поверхности разрыва только по данным ГНСС, затем рассчитали

величину смещений в направлении на спутник, ведущий съемку с восходящей и нисходящей орбит, и выполнили качественное сравнение полученных результатов с полями смещений по РСА-интерферометрии.

Задача состояла в определении размеров поверхности разрыва, ее глубины, углов падения и простираения, а также подвижки по падению и по простираению на составляющих ее элементах. Для расчета смещений на поверхности Земли в результате подвижки на расположенной в ней прямоугольной площадке использовано решение и программный код Static1D (Pollitz, 1996), полученное для сферической планеты, механические свойства слоев которой зависят от радиуса. Для регуляризации обратной задачи в функционал добавлено условие близости вектора подвижки к чистому надвигу. Вес этого условия варьировался в процессе поиска решения. Схема решения обратной задачи подробно изложена в работах (Diament et al, 2020; Mikhailov et al., 2023).

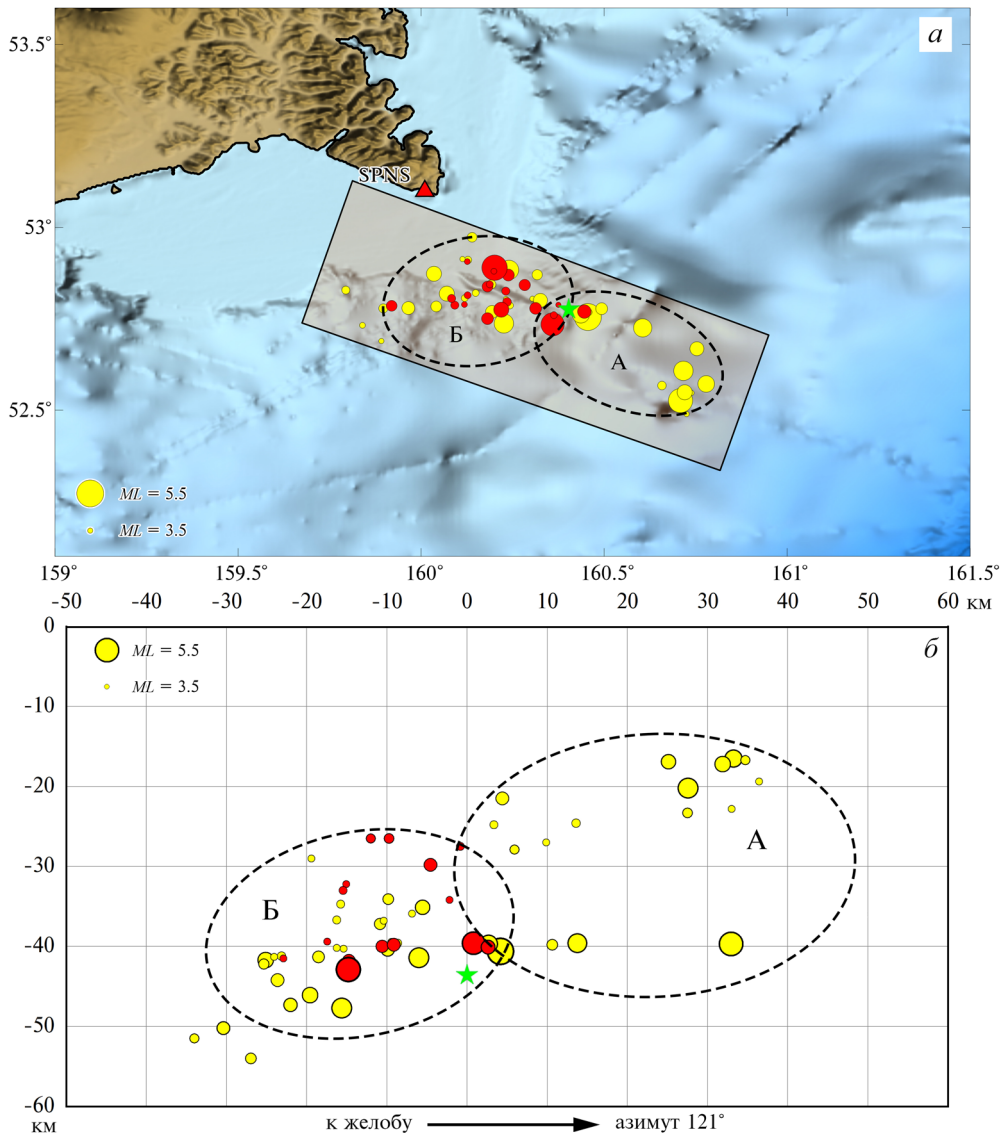


Рис. 2. Положение афтершоков в радиусе 70 км вокруг очага Шипунского землетрясения в плане (а) и в разрезе (б). Красные круги — события в первые два часа после землетрясения (до повторного пролета спутника 17.08.2024), желтые круги — в течение двух суток после него. Прямоугольником показана полоса, события из которой вынесены на вертикальный разрез на рис. 2б. Разрез проходит вдоль длинной стороны прямоугольника, от по-ва Камчатка (слева) в океан (справа). Зеленая звезда — эпицентр землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН. А и Б — группы афтершоков.

Fig. 2. The aftershock distribution within a 70 km radius around the Shipunski earthquake epicenter in map view (a) and cross-section (b). Red circles represent events occurring within the first two hours after the earthquake (before the satellite's next pass on August 17, 2024), and yellow circles represent events within two days after the earthquake. The rectangle indicates the area from which events are projected onto the vertical cross-section in Fig. 2b. The cross-section runs along the longer side of the rectangle, from the peninsula Kamchatka (on the left) to the ocean (on the right). The green star marks the earthquake epicenter according to KB GS RAS data. A and Б — groups of aftershocks

Для поиска решения была выполнена большая серия численных экспериментов. Геометрия поверхности разрыва Шипунского землетрясения основана на механизмах очага по данным USGS и GCMT и на распределении афтершоков из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН (рис. 3). При подборе менялись такие параметры, как углы падения и простирания плоскости разрыва, глубины и количество элементов разбиения модели. Для каждого набора этих параметров определя-

лось поле смещений на элементах поверхности разрыва из условия минимума функционала, составленного из невязок, вычисленных и измеренных смещений пунктов GPS на север, восток и по вертикали, и регуляризирующего условия.

В конечном итоге была выбрана модель, состоящая из одной плоскости с углом падения 30°, простиранием 211° (параметры близкие к нодальным плоскостям NP1 в решениях USGS и GCMT). Плоскость разделена на 10 одинаковых

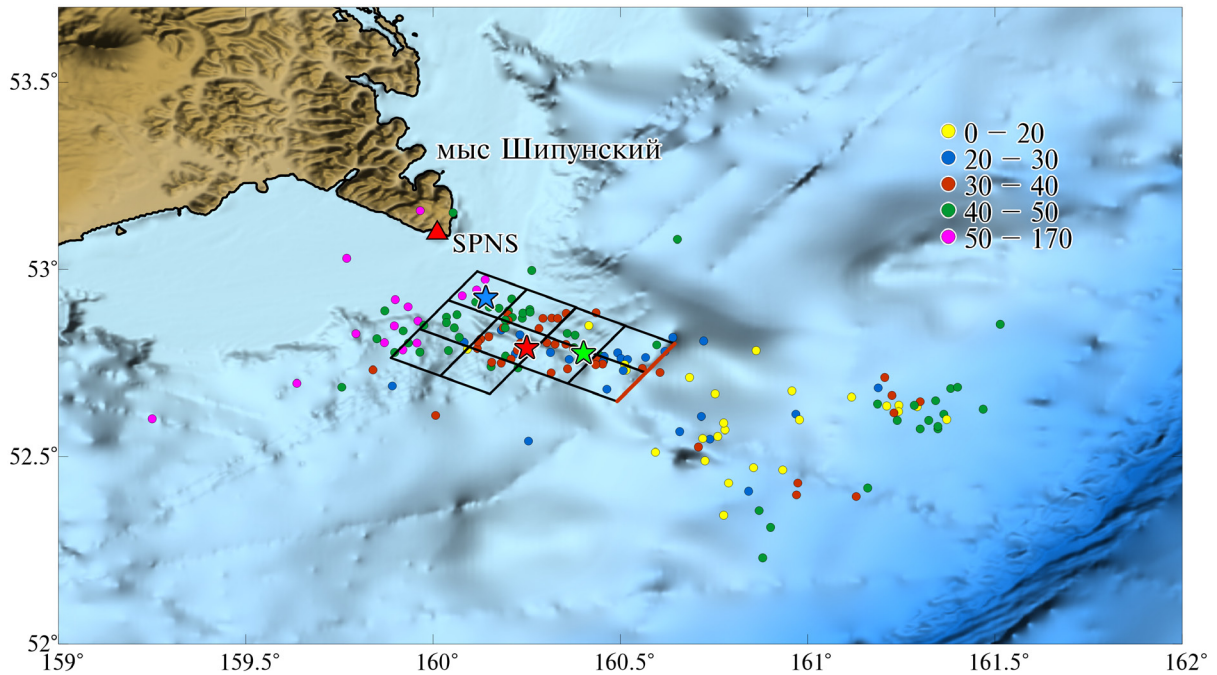


Рис. 3. Распределение афтершоков и геометрия модели поверхности разрыва Шипунского землетрясения (черные четырехугольники). Зеленая, синяя и красная звезды — эпицентры землетрясения по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, USGS и GCMT соответственно. Красным треугольником показан ближайший к эпицентру пункт ГНСС сети на мысе Шипунский (SPNS). Верхняя грань поверхности разрыва показана красной линией. Верхние кромки каждого ряда элементов находятся на глубинах 25, 31, 37, 43 км. Цвет кругов показывает интервалы глубин афтершоков в км.

Fig. 3. The aftershock distribution and the geometry of the Shipunski earthquake rupture surface model (black quadrilaterals). The green, blue, and red stars indicate the earthquake epicenters according to KB GS RAS, USGS, and GCMT, respectively. The red triangle marks the GNSS station nearest to the epicenter, located at Cape Shipunski (SPNS). The upper edge of the rupture surface is shown as a red line. The top edges of each row of elements are located at depths of 25, 31, 37, and 43 km. The color of the circles indicates the depth ranges of aftershocks in km.

элементов 10 км на 12 км (по простиранию и по падению соответственно), глубина верхний кромки плоскости 25 км, нижней — 49 км (рис. 3).

Согласно полученной модели, на поверхности разрыва произошел почти чистый надвиг (средний угол подвижки 89.8°). Поле смещений однородно по всей плоскости разрыва. Максимальное смещение равно 0.88 м при среднем смещении 0.79 м.

В целом модельные смещения соответствуют данным ГНСС (рис. 4). Невязки горизонтальных смещений не превосходят 10 %, за исключением пунктов, расположенных в дальней зоне (рис. 4а). Хотя вертикальные смещения, как правило, определяются по ГНСС значительно хуже горизонтальных, смещения, рассчитанные из полученной нами модели поверхности разрыва, совпадают, в пределах ошибок определения, с реальными на большинстве пунктов ближней зоны (окрестности Петропавловска-Камчатского (PETR) и мыс Шипунский (SPNS)), кроме станций KZLS и MYAK (рис. 4б). Удаленные от очага пункты APC1, MIL4 и UBR3 показали смещения на уровне погрешности и на рисунке не представлены.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Построенная модель поверхности разрыва Шипунского землетрясения хорошо согласуется с данным ГНСС, а параметры поверхности разрыва близки к сейсмологическим решениям GCMT и USGS. Смещения произошли на глубинах от 25 до 49 км и в среднем составили 79 см. Напомним, что глубина гипоцентра определена в 29 км (USGS), 43.3 км (КФ ФИЦ ЕГС РАН), глубина центра 45.7 км (GCMT). С учетом геометрии модели и полученного поля смещений, сейсмический момент, рассчитанный при значении модуля сдвига 32 ГПа, составил 2.9×10^{19} Н·м. Это соответствует моментной магнитуде $M_w = 6.9$.

По сравнению с решением, представленном на сайте USGS, поверхность разрыва сдвинута от континента и вытянута по падению, что лучше соответствует положению облака афтершоков по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН.

По полученной модели поверхности разрыва, решив прямую задачу, можно рассчитать поле смещений в направлении LOS. Смещения на континенте произошли в основном

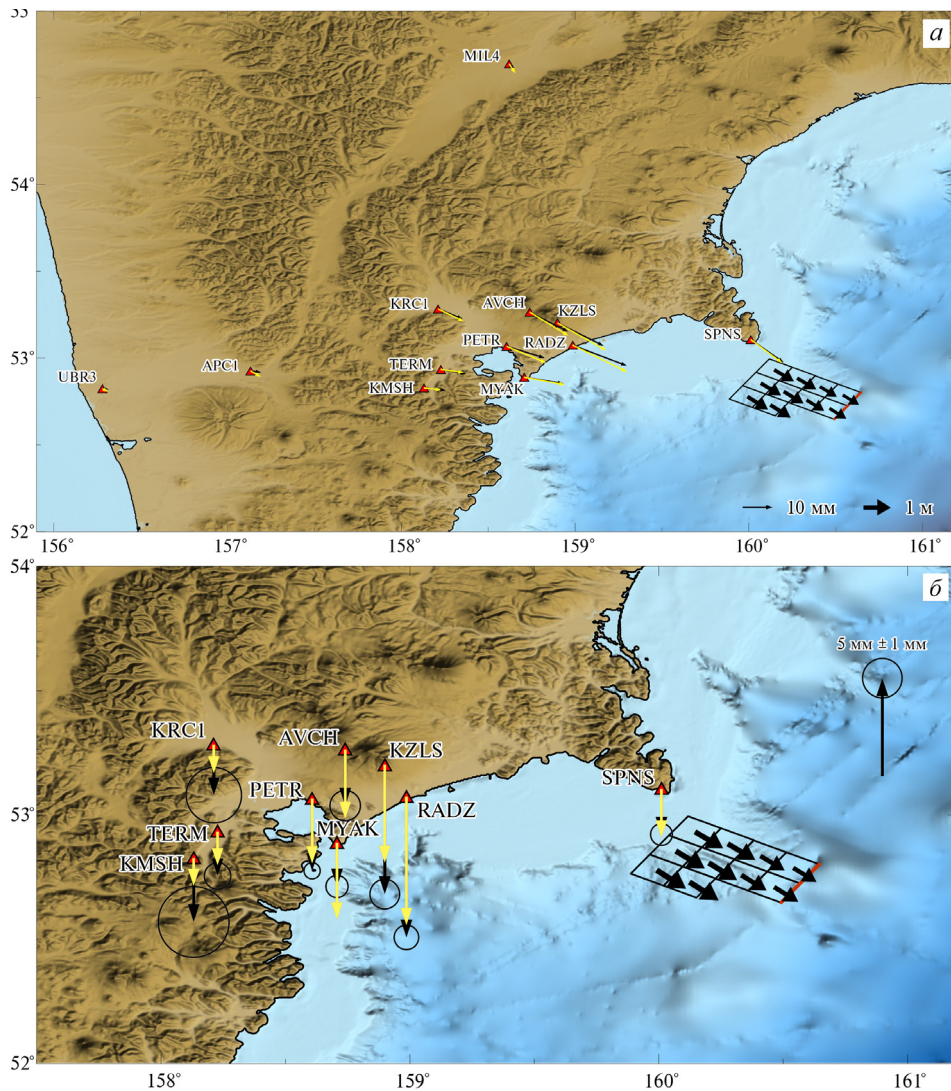


Рис. 4. Поле смещений на поверхности разрыва (жирные черные стрелки) и сравнение наблюдаемых и модельных косейсмических смещений пунктов GPS: *a* — горизонтальные смещения; *б* — вертикальные. Желтыми стрелками обозначены смещения, рассчитанные из модели, черными — реальные смещения пунктов GPS.

Fig. 4. Displacement field on the rupture surface (bold black arrows) and comparison of observed and modeled coseismic displacements at GPS stations: *a* — horizontal displacements; *б* — vertical displacements. Yellow arrows represent displacements calculated from the model, while black arrows indicate the actual displacements of the GPS stations.

в восточном направлении и войдут в смещения в направлении на спутник со знаком плюс (смещения считаются положительными, если они направлены на спутник) для нисходящей орбиты.

При движении спутника по восходящей орбите смещения на восток войдут в смещения на спутник со знаком минус. Рассчитанные по модели смещения в направлении LOS (рис. 5*a*, 5*б*) с нисходящей орбиты положительные (к спутнику), а с восходящей — отрицательные (от спутника), что соответствует полученным РСА-данным. Однако величина модельных смещений для нисходящей орбиты составляет 0.65 см, а с восходящей чуть больше 1 см. Такие смещения

находятся на уровне точности оценок смещений методом DInSAR, особенно в горных областях. Существенные помехи вносятся возмущениями атмосферы и горным рельефом.

Полученные поля смещений коррелируют с рельефом. В результате в поле смещений, полученном с нисходящей орбиты, горы проявились отрицательными значениями (рис. 5*a*), а с восходящей — положительными (рис. 5*б*). Это, безусловно, эффект атмосферы, который, в принципе, можно частично скомпенсировать применением погодных моделей, например, с использованием данных сервиса Generic Atmospheric Correction Online Service — GACOS (Yu et al., 2017*a*, 2017*b*). В то же время, наши исследования для

МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

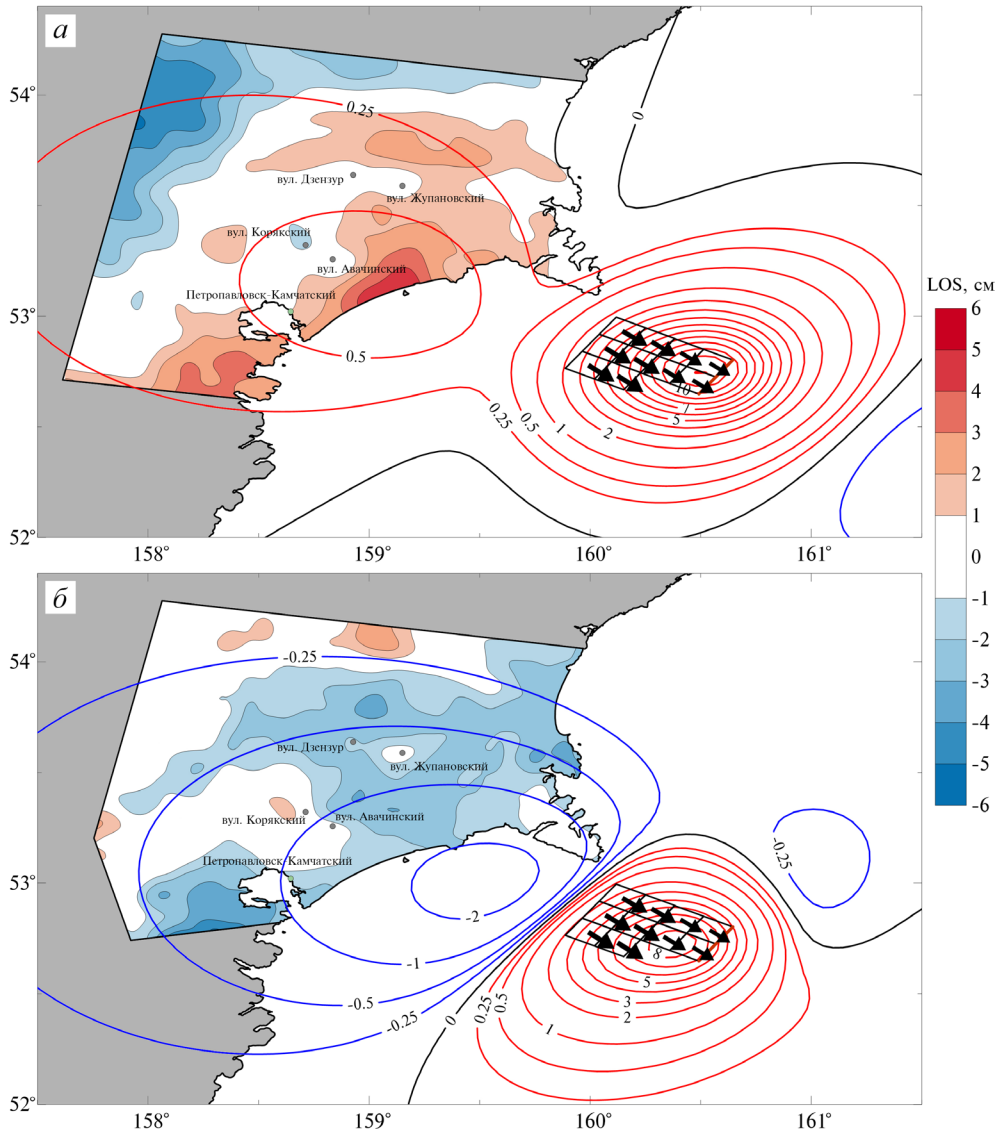


Рис. 5. Модель поверхности разрыва (показана черными четырехугольниками, смещения на поверхности разрыва — черные стрелки) и поля смещений на земной поверхности в направлении на спутник (LOS) с нисходящей (а) и восходящей (б) орбиты. Изолинии — поля, рассчитанные по модели поверхности разрыва в см (красные — смещения к спутнику, синие — от спутника). Цветной шкалой показаны соответствующие смещения, полученные по данным PCA-интерферометрии с помощью сервиса ASF HyP3.

Fig. 5. The rupture surface model (shown as black quadrilaterals, with displacement vectors on the rupture surface represented by black arrows) and surface displacement fields in the line-of-sight direction for the descending (a) and ascending (b) orbits. Contour lines represent displacement fields calculated based on the rupture surface model in centimeters (red — to the satellite, blue — from it). The color scale indicates corresponding displacements derived from SAR interferometry data using the ASF HyP3 service.

территории Камчатки (Волкова, 2024) показали, что атмосферные коррекции дают положительный результат не всегда. Это связано с тем, что погодные модели строятся с большим шагом по пространству и по времени, а условия в горных районах меняются быстро и по пространству, и по времени. В случае Шипунского землетрясения попытки улучшить результаты с применением GACOS положительных результатов не дали.

Тем не менее, сравнение расчетных и спутниковых данных показывает, что положение экстремумов полей смещений и их знаки совпадают.

Это, по нашему мнению, может служить подтверждением построенной модели поверхности сейсмического разрыва.

Сопоставление расчетных и реальных полей смещений по данным PCA-интерферометрии дает важную информацию о возможностях этого метода в условиях п-ова Камчатка. У нас есть ряд положительных примеров применения этого метода для изучения землетрясений и вулканических событий в Камчатском регионе (Конвисар и др., 2023; Михайлов и др., 2021; Mikhailov et al., 2023; Volkova et al., 2022 и др.), но поля смещений

во всех случаях были во много раз больше. Этот пример полезен для понимания возможностей метода в сложных условиях и при малой величине отношения сигнал/шум.

ВЫВОДЫ

Представленная модель поверхности разрыва Шипунского землетрясения, построенная на основе данных ГНСС, демонстрирует высокую согласованность с полями измеренных смещений на пунктах ГНСС и сейсмологическими решениями USGS и GCMT. Поверхность разрыва охватывает 30 км по простиранию и глубины от 25 до 49 км, что, при среднем смещении в 79 см, соответствует магнитуде $M_w=6.9$.

Хотя величины смещений на спутник оказались близкими к уровню погрешностей метода DInSAR, морфология модельных и измеренных полей смещений совпадает.

Полученные результаты показывают эффективность комплексного подхода, включающего ГНСС-данные и РСА-интерферометрию, для изучения сейсмических процессов, но подчеркивают ограниченность метода DInSAR для регистрации слабых смещений в горных районах.

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные радарные снимки спутников Сентинель-1А, разработчиков сервиса ASF НуРЗ и Ф. Поллитца (USGS) за разработку программного кода StaticID.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на УНУ (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>) в рамках госзадания КФ ФИЦ ЕГС РАН.

Список литературы [References]

Волкова М.С., Михайлов В.О., Османов Р.С. Анализ эффективности применения глобальной погодной модели HRES (GACOS) для коррекции атмосферных поэм в интерферометрических оценках полей смещений на примере вулканов Камчатки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С. 9–22. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2024-21-2-9-22> [Volkova M.S., Mikhailov V.O., Osmanov R.S. Analysing the efficiency of the global weather model HRES (GACOS) for correction of atmospheric noise in interferometric estimates of displacement fields on the example of volcanoes in Kamchatka // Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa. 2024. V. 21. № 2. P. 9–22 (in Russian)].

Конвисар А.М., Михайлов В.О., Волкова М.С., Смирнов В.Б. Модель поверхности сейсмического разрыва землетрясения «Чигник» (Аляска, США) 29.07.2021 по данным спутниковой радарной интерферометрии и ГНСС // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 74–83. <https://doi.org/10.31857/S0203030623700256> [Konvisar A.M.,

Mikhailov V.O., Volkova M.S., Smirnov V.B. A Model of Seismic Rupture Surface of the Chignik Earthquake (Alaska, USA) July 29, 2021 Based on Satellite Radar Interferometry and GNSS // Journal of Volcanology and Seismology. 2023. № 5. P. 418–427. <https://doi.org/10.1134/S0742046323700276>].

Михайлов В.О., Волкова М.С., Тимошкина Е.П., Шапиро Н.М., Смирнов В.Б. О связи активизации вулкана Корякский в 2008–2009 гг. с глубинными магматическими процессами // Физика Земли. 2021. № 6. С. 3–9. <https://doi.org/10.31857/S0002333721060041> [Mikhailov V.O., Volkova M.S., Timoshkina E.P., Shapiro N.M., Smirnov V.B. On the Connection between the 2008–2009 Activation of the Koryakskii Volcano and Deep Magmatic Processes // Izvestiya. Physics of the Solid Earth. 2021. № 6. P. 819–824. <https://doi.org/10.1134/S1069351321060045>].

Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2011. V. 12. № 11. P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>

Båth M., Benioff H. 1958. The aftershock sequence of the Kamchatka earthquake of November 4, 1952 // Bulletin of the Seismological Society of America. 1958. V. 48(1). P. 1–15. <https://doi.org/10.1785/BSSA0480010001>

Bilek S.L., Lay T. Subduction zone megathrust earthquakes // Geosphere. 2018. V. 14. № 4. P. 1468–1500. <https://doi.org/10.1130/GES01608.1>

Diament M., Mikhailov V., Timoshkina E. Joint inversion of GPS and high resolution GRACE gravity data for the 2012 Wharton basin earthquakes // Journal of Geodynamics. 2020. V. 136. Article ID 101722. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2020.101722>

Ferretti A. Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space. Bunnik, Netherlands: EAGE Publications, 2014. 159 p. <https://doi.org/10.3997/9789073834712>

Hanssen R.F. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht, Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2001. 308 p. <https://doi.org/10.1007/0-306-47633-9>

Hayes G.P., Moore G.L., Portner D.E. et al. Slab2, a comprehensive subduction zone geometry model // Science. 2018. V. 362(6410). P. 58–61. <https://doi.org/10.1126/science.aat4723>

Herring T.A., King R.W., Floyd M., McClusky S.C. Introduction to GAMIT/GLOBK. Release 10.7. Technical report. Massachusetts Institute of Technology. 2018.

MacInnes B.T., Weiss R., Bourgeois J., Pinegina T. K. Slip Distribution of the 1952 Kamchatka Great Earthquake Based on Near-Field Tsunami Deposits and Historical Records // Bulletin of the Seismological Society of America. 2010. V. 100 № 4. P. 1695–1709. <https://doi.org/10.1785/0120090376>

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. P. 3423 – 3433. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03351-6>

Pollitz F.F. Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // Geophysical Journal International. 1996. V. 125. № 1. P. 1–14. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>

- Volkova M.S., Shapiro N.M., Melnik O.E. et al.* Subsidence of the Lava Flows Emitted During the 2012-2013 Eruption of Tolbachik (Kamchatka, Russia): Satellite Data and Thermal Model // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2022. V. 427. P. 107554. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107554>
- Yu C., Penna N.T., Li Z.* Generation of real-time mode high-resolution water vapor fields from GPS observations // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2017a. V.122. P. 2008–2025. <https://doi.org/10.1002/2016JD025753>
- Yu C., Li Z., Penna N.T.* Interferometric synthetic aperture radar atmospheric correction using a GPS-based iterative tropospheric decomposition model // *Remote Sensing of Environment*. 2017b. V. 204. P. 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.038>

THE SEISMIC RUPTURE SURFACE MODEL OF THE AUGUST 17, 2024 SHIPUNSKI, KAMCHATKA, EARTHQUAKE

**A.M. Konvisar^{1,2}, E.P. Timoshkina¹, N.N. Titkov², V.O. Mikhailov¹,
M.S. Volkova¹, V.B. Smirnov^{1,3}, D.V. Chebrov²**

¹*Shmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 123242;
e-mail: alexkonvisar@gmail.com*

²*Kamchatka Branch of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences,
Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia, 683006*

³*Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russia, 119991*

Received November 23, 2024; revised March 19, 2025; accepted March 25, 2025

The study presents a rupture surface model of the Shipunsky earthquake. The model consists of a single plane with a dip angle of 30°, a strike of 211°, and depths ranging from 25 to 49 km. Compared to USGS solution, the rupture surface is shifted away from the continent and extended along dip, which corresponds better to the aftershock cloud distribution according to the Kamchatka branch of the Federal Research Center «Unified Geophysical Service of RAS». The rupture exhibited nearly pure thrust, with a maximum displacement of 0.88 m and an average displacement of 0.79 m, corresponding to a seismic moment of 2.9×10^{19} N·m ($M_w = 6.9$). The obtained model is in good agreement with GPS data. The model allowed for the calculation of theoretical displacement fields on the Earth's surface in the satellite line-of-sight direction. A qualitative comparison with displacements derived from Sentinel-1A radar images was made.

Keywords: Shipunski earthquake, August 17, 2024, GNSS, SAR interferometry, rupture surface model.