

УДК 550.31

## МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ “ЧИГНИК” (АЛЯСКА, США) 29.07.2021 ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ И ГНСС

© 2023 г. А. М. Конвисар<sup>a, b, \*</sup>, В. О. Михайлов<sup>a</sup>, М. С. Волкова<sup>a</sup>, В. Б. Смирнов<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ул. Большая Грузинская, 10, стр. 1, Москва, 123242 Россия

<sup>b</sup>Физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,  
Ленинские Горы, 1, стр. 2, Москва, 119991 Россия

\*e-mail: alexkonvisar@gmail.com

Поступила в редакцию 13.06.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

В работе представлена новая модель поверхности сейсмического разрыва землетрясения “Чигник”  $M_w = 8.2$ , которое произошло у побережья полуострова Аляска 29.07.2021. Модель построена по данным о полях смещений земной поверхности, полученных методами спутниковой радарной интерферометрии по снимкам спутников Sentinel-1A и 1B, и данным о горизонтальных смещениях на пунктах GPS в районе землетрясения. Используются спутниковые радарные снимки за период с 17.07 по 10.08.2021 и данные GPS с 18.07 по 08.08.2021. Все эти смещения включают косейсмические и часть постсейсмических смещений. При построении модели поверхности разрыва использовано решение Ф. Поллитца задачи о поле смещений поверхности сферической радиально расслоенной планеты в результате смещений на расположенном внутри нее прямоугольном разрыве. В качестве регуляризации решаемой обратной задачи ставилось условие близости направления подвижки на каждом элементе плоскости разрыва к заданному направлению, определяемому по данным сейсмологии. В построенной модели область сейсмического разрыва аппроксимирована одной плоскостью протяженностью 225 км по простиранию, 126 км по падению, разделенной на 48 одинаковых элементов. Согласно построенной модели, тип смещений – это практически чистый надвиг, а смещения, в целом, произошли по всей очаговой области. Максимальное смещение составило 5.7 м при среднем смещении по всей плоскости 2.2 м. Сейсмический момент, рассчитанный при значении модуля сдвига 32 ГПа по полученным параметрам площадки и смещениям на ней, составил  $1.95 \times 10^{21}$  Н м ( $M_w = 8.13$ ), что близко к оценкам USGS и GCMT, полученным по сейсмологическим данным.

**Ключевые слова:** землетрясение, Аляска, США, “Чигник”, 27 июля 2021, спутниковая радарная интерферометрия, поля смещений, GPS, обратная задача, модель поверхности разрыва

**DOI:** 10.31857/S0203030623700256, **EDN:** LWUUIH

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в науках о Земле все шире используются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), в частности, снимки, выполненные радарными с синтезированной апертурой (РСА), позволяющие оценивать смещения земной поверхности, связанные с активными геодинамическими или техногенными процессами. В частности, данные спутниковой геодезии позволили детально исследовать развитие косейсмических и постсейсмических процессов, обнаружить новые явления, такие как “тихие” землетрясения – смещения по разломам, не сопровождающиеся генерацией сейсмических волн. В данной работе методы РСА-интерферометрии применены для изучения крупного землетрясения 29 июля 2021 г.

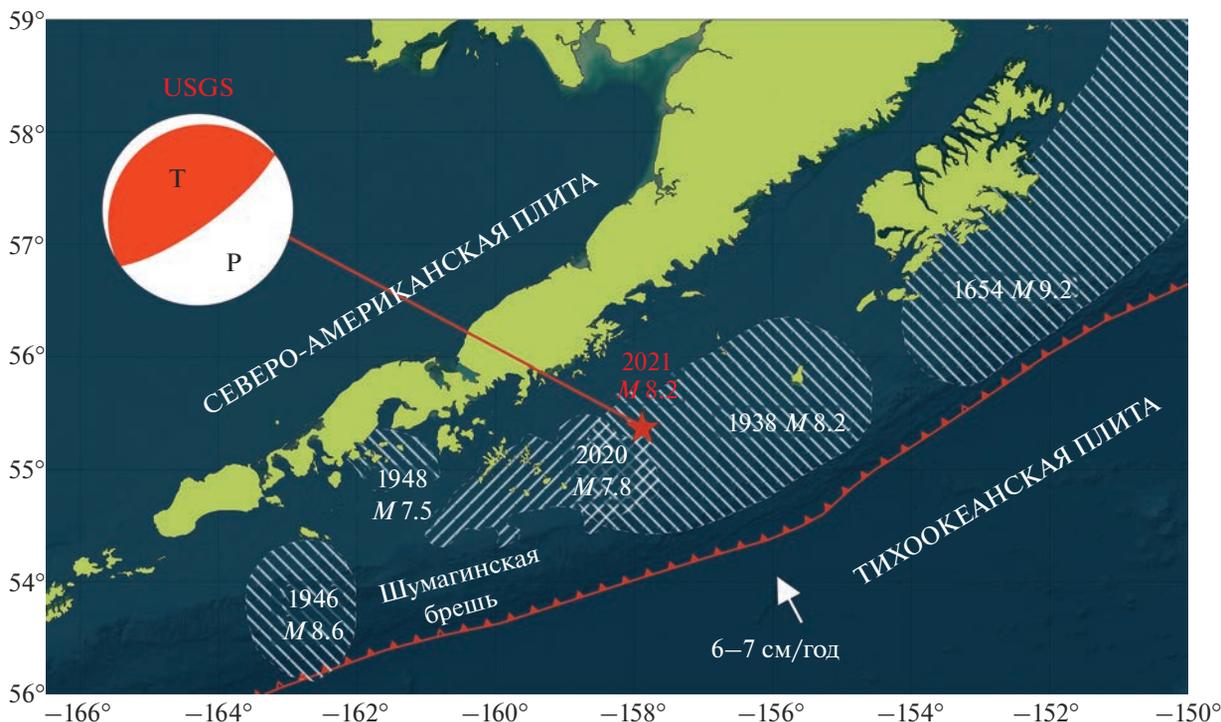
( $M_w = 8.2$  по GCMT<sup>1</sup>) в районе полуострова Аляска, США.

Это землетрясение стало сильнейшим в США за последние 58 лет. Эпицентр землетрясения имел, по данным Геологической службы США (USGS)<sup>2</sup>, координаты  $55.364^\circ$  с.ш.  $157.888^\circ$  з.д. (рис. 1), что недалеко от городка Чигник, поэтому далее, следуя [Liu et al., 2022], землетрясение будем именовать “Чигник”.

Данное землетрясение произошло в Алеутской зоне субдукции, которая представляет собой конвергентную границу Северо-Американской и Ти-

<sup>1</sup> <https://www.globalcmt.org/>

<sup>2</sup> <https://earthquake.usgs.gov/>



**Рис. 1.** Область землетрясения “Чигник”, Аляска, 29.07.2021. Стереографическая проекция нодальных плоскостей землетрясения и его эпицентр (красная звезда) даны по данным USGS. Заштрихованные области показывают зоны афтершоков прошлых сильных землетрясений на границе плит [Davies et al., 1981]. Красная линия с зубцами – положение оси океанического желоба.

хоокеанской плит длиной около 3400 км. Погружение Тихоокеанской плиты под Северо-Американскую происходит со средней скоростью 6–7 см/год и сопровождается сильными землетрясениями вдоль большей части Алеутской островной дуги [Freymueller et al., 2008, Argus et al., 2011].

Сейсмическое событие произошло в районе, где ранее было зафиксировано несколько сильных землетрясений с магнитудами 7.8 и более ( $M_w = 8.3$  в 1938 г.,  $M_w = 7.8$  в 2020 г.). Восточнее области землетрясения “Чигник” располагается очаговая зона гораздо более крупного Великого Аляскинского землетрясения 1964 г. с магнитудой  $M_w = 9.2$  [Suito, Freymueller, 2009; Ali, Freed, 2010], а на западе расположена так называемая Шумагинская сейсмическая брешь – область, где, по крайней мере, с начала XX-го века и до 2020 г. не наблюдалось сильных землетрясений [Davies et al., 1981; Ye et al., 2021]. Вопрос о том, остался ли в пределах Шумагинской бреши запертый участок зоны субдукции остается открытым (см. рис. 1).

Геодезические наблюдения показывают, что на границе плит в районе землетрясения “Чигник” в течение нескольких десятилетий накапливался значительный дефицит смещений, который, учитывая среднюю скорость сближения плит, со времени последнего сильного землетря-

сения 1938 г. мог достичь 5 м [Cross, Freymueller, 2008; Drooff, Freymueller, 2021].

Изучению землетрясения “Чигник” был посвящен ряд работ. Так модель [Liu et al., 2022] и модель, опубликованная на сайте Геологической службы США, основаны на анализе записей сейсмических широкополосных станций, а авторы [Ye et al., 2022] использовали также данные приливных станций и донных датчиков давлений DART (от англ. Deep-ocean Assessment and Reporting of Tsunamis). В статье [Elliott et al., 2022] приведена модель поверхности разрыва, основанная на данных спутниковой радарной интерферометрии, но только на отдельных участках с хорошей когерентностью.

В данной работе на основе решений фокального очага землетрясения, временных рядов смещений на пунктах глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) GPS и данных о смещениях земной поверхности, рассчитанных по шестнадцати спутниковым радарным снимкам с 4-х орбит спутников Sentinel-1, определена геометрия поверхности сейсмического разрыва и оценено поле смещений на ней. Построенная модель позволяет исследовать соотношение очаговых зон землетрясений 1938 г. и 2020 г. и землетрясения “Чигник” 29.07.2021. Информация о соотношении очаговой области нового землетрясения с

очаговыми зонами ранее произошедших землетрясений имеет большое значение для оценки сейсмического потенциала отдельных участков зоны субдукции.

### ОЦЕНКА ПОЛЕЙ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В данной работе была применена технология дифференциальной РСА-интерферометрии, называемой также DInSAR (от англ. Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar), которая позволяет оценивать поля смещений земной поверхности путем совместной обработки радарных снимков одной и той же территории при повторной съемке [Bürgmann et al., 2000; Hanssen, 2001; Ferretti, 2014].

На первом этапе интерферометрической обработки РСА данных выполняется расчет дифференциальной фазовой интерферограммы по паре радарных снимков. Этот процесс состоит из последовательности процедур, включая совмещение (корегистрацию) двух радарных снимков, некогерентное пространственное осреднение (multi-looking), введение поправки за влияние топографии с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР). Каждый элемент парной интерферограммы  $\Delta\phi$  равен фазовому сдвигу сигналов (набегу фазы), отраженных от одного и того же элемента земной поверхности при первой и второй съемке. Набег фазы меняется в пределах от  $-\pi$  до  $\pi$  (т.е. он свернут по модулю  $2\pi$ ) и включает пять компонент [Hooper et al., 2007]:

$$\Delta\phi = W \left\{ \frac{4\pi}{\lambda} \Delta R + \alpha + \beta + \theta + \varepsilon \right\}, \quad (1)$$

где первый член  $\Delta R$  определяется смещением отражающей площадки в направлении на спутник за период между съемками,  $\lambda$  — длина волны радарного сигнала, а остальные члены — это набег фазы, вызванный:  $\alpha$  — различием в условиях распространения электромагнитных волн в атмосфере в моменты съемки,  $\beta$  — неточным знанием орбиты спутника,  $\theta$  — ошибкой в определении угла видения спутника, которая возникает из-за ошибок задания ЦМР,  $\varepsilon$  — различными, в том числе аппаратными, шумами и неучтенными ошибками.  $W\{\dots\}$  — оператор свертки по модулю  $2\pi$ .

После введения поправок за сферичность Земли производится пространственная фильтрация интерферограммы [Goldstein, Werner, 1998], что позволяет снизить уровень слабо коррелированных фазовых шумов и других помех, и выделить компоненту, связанную со смещениями отражающей площадки.

Поскольку фазовые значения на интерферограмме свернуты по модулю  $2\pi$ , на следующем этапе производится развертка фазы — добавление не-

**Таблица 1.** Пары радарных снимков с восходящей орбиты спутника Sentinel-1B и с нисходящей орбиты спутника Sentinel-1A, использованные в данной работе, в формате ДД.ММ.ГГ\_чч:мм:сс

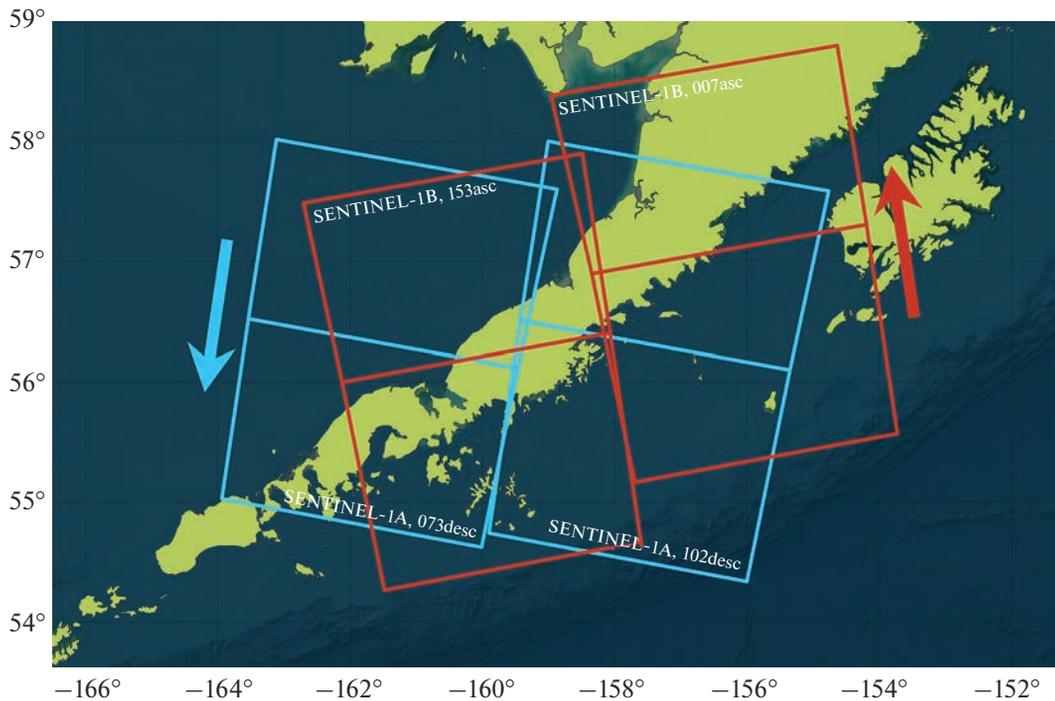
Спутник, орбита	Первый снимок	Второй снимок
Sentinel-1B, 153	29.07.21_04:24:10	10.08.21_04:24:11
Sentinel-1B, 153	29.07.21_04:23:42	10.08.21_04:23:43
Sentinel-1B, 7	19.07.21_04:07:57	31.07.21_04:07:58
Sentinel-1B, 7	19.07.21_04:07:29	31.07.21_04:07:30
Sentinel-1A, 73	17.07.21_17:04:05	10.08.21_17:04:06
Sentinel-1A, 73	17.07.21_17:03:40	10.08.21_17:03:42
Sentinel-1A, 102	19.07.21_16:47:38	31.07.21_16:47:39
Sentinel-1A, 102	19.07.21_16:47:13	31.07.21_16:47:14

обходимого числа полных фазовых циклов к каждому измерению. Развертка фазы является наиболее сложным и ресурсоемким этапом интерферометрической обработки спутниковых снимков. Имеется большое число различных методов развертки фазы, например, [Goldstein et al., 1988; Howard et al., 1997 и др.], из которых нами был выбран метод MCF (от англ. Minimum Cost Flow) [Costantini, Rosen, 1999]. Результатом развертки является поле фазового сдвига, которое может включать длиннопериодные компоненты, связанные с неточным знанием орбит и с атмосферными эффектами. Эти компоненты устраняются путем задания набора контрольных точек с известными координатами и смещениями (как правило, это точки с нулевыми смещениями вне поля ожидаемых деформаций). На финальном этапе развернутое фазовое поле пересчитывается в значения смещений поверхности и геокодируется, т.е. переводится из системы координат спутника в заданную картографическую проекцию.

Более подробно весь процесс обработки спутниковых радарных снимков описан, например, в статье [Ferretti, 2014].

В работе было использовано шестнадцать радарных снимков со спутников Европейского космического агентства Sentinel-1A и 1B (С-диапазон, длина волны  $\lambda = 5.6$  см), выполненных за период с 17.07 по 10.08.2021 (табл. 1, рис. 2). Все этапы обработки выполнялись с использованием специализированного программного пакета ENVI SARscape и геоинформационной системы QGIS.

На рис. 3 представлены поля смещений в направлении на спутник в результате землетрясения “Чигник”, полученные по парам снимков 19.07–31.07.2021 и 29.07–10.08.2021 с двух восходящих орбит спутника Sentinel-1B (см. рис. 3а) и по парам снимков 17.07–10.08.2021 и 19.07–31.07.2021 с двух нисходящих орбит спутника Sentinel-1A (см. рис. 3б). Смещения на спутник равны сумме горизонтальных и вертикальных компо-



**Рис. 2.** Область покрытия района землетрясения “Чигник” снимками с 73-й и 102-й нисходящих орбит спутника Sentinel-1A (голубые прямоугольники) и снимками 153-й и 7-й восходящих орбит спутника Sentinel-1B (красные прямоугольники).

нент вектора смещений, умноженных на соответствующие тригонометрические функции угла наклона радарного луча и азимута полета. Поскольку, согласно данным сейсмологии, смещения земной поверхности в районе землетрясения содержат значительную горизонтальную компоненту, карты смещений на спутник, полученные по снимкам с восходящей и нисходящей орбиты, существенно различаются. Это различие учитывается при решении обратной задачи, т.к. углы для расчета смещений в направлении на спутник известны. Максимальные смещения с восходящего трека составили  $-33$  см, с нисходящего  $+20$  см.

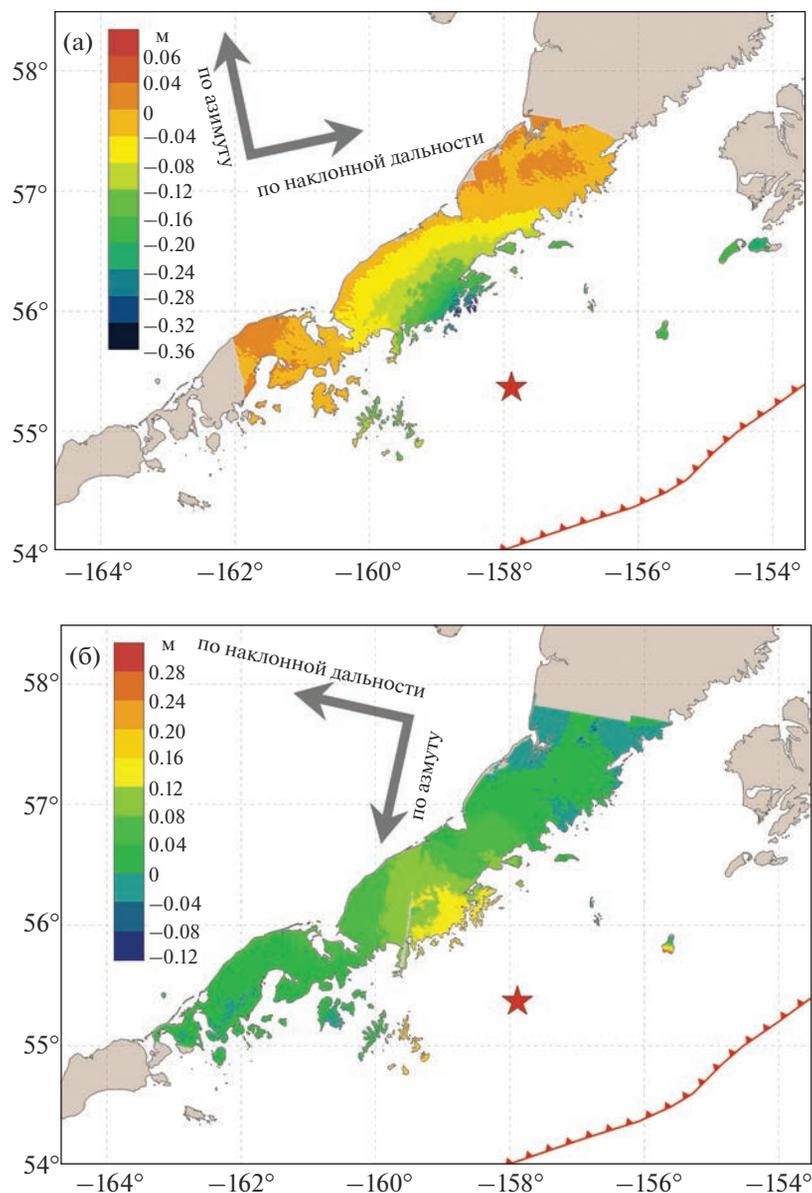
### МОДЕЛЬ ПОВЕРХНОСТИ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЗРЫВА

При решении обратной задачи поверхность сейсмического разрыва, как правило, аппроксимируют набором прямоугольных элементов и применяют аналитическое решение задачи о смещениях земной поверхности в результате смещений в плоскости этого элемента (разреза) по падению и простиранию, например [Михайлов и др., 2022]. Большое количество моделей поверхности разрыва землетрясений, например, модели USGS, строятся с использованием решения для однородного упругого полупространства с плоской свободной поверхностью [Okada, 1985, 1992]. В работе [Pollitz, 1996] для вязкоупругой реологии

получено решение задачи о поле смещений на поверхности сферической радиально расслоенной планеты в результате смещений на расположенном внутри нее прямоугольном разрезе. В этой работе показано, что для крупных землетрясений игнорирование расслоенности Земли может приводить к ошибкам до 20%, особенно при наличии значительной сдвиговой компоненты. Также к погрешностям ведет замена сферической свободной поверхности на плоскую. Поэтому в нашем исследовании использовалось решение [Pollitz, 1996]. Программный код Static1D, реализующий это решение, доступен на сайте USGS.

Задача решалась в следующей постановке. Для области землетрясения имеются данные о смещениях в направлении на спутник, полученные по РСА интерферометрии  $W_i^{meas}$  и данные о горизонтальных смещениях на восток и север на пунктах GPS  $E_i^{meas}$  и  $N_i^{meas}$ . Необходимо определить поле смещений на поверхности разрыва заданной геометрии так, чтобы среднеквадратическое отклонение расчетных и измеренных смещений было минимально.

Поверхность разрыва аппроксимировалась прямоугольной областью, разделенной на 6 элементов по падению и 8 по простиранию. Данные сейсмологии и геодинамики дают углы простирания и падения плоскости, а ее линейные размеры



**Рис. 3.** Поля смещений в метрах в направлении на спутник в результате землетрясения “Чигник”, Аляска. а – по парам снимков 19.07–31.07.2021 и 29.07–10.08.2021 с восходящих орбит спутника Sentinel-1B; б – по парам снимков 17.07–10.08.2021 и 19.07–31.07.2021 с нисходящих орбит спутника Sentinel-1A. Красная звезда – эпицентр землетрясения. Красная линия с зубцами – положение оси океанического жолоба. Стрелки указывают направление полета (азимут) и направление распространения радарного сигнала (дальность).

и пространственное положение подбирались с учетом координат гипоцентра землетрясения и положения облака афтершоков.

В такой постановке задача сводится к нахождению минимума функционала относительно неизвестных смещений по падению  $D_j$  и простираю  $S_j$  на каждом элементе поверхности разрыва. Функционал (2) включает взятые с соответствующими весами среднеквадратические отклонения вычисленных и измеренных смещений на 13 пунктах GPS и в 1616 точках поверхности Земли, где за-

даны смещения в направлении на спутник по данным интерферометрии:

$$\begin{aligned} & \left( \sum_{i=1}^M [E_i^{meas} - E_i^{calc}(u, g)] \right)^2 + \\ & + \left( \sum_{i=1}^M [N_i^{meas} - N_i^{calc}(u, g)] \right)^2 + \\ & + \alpha \left\{ \sum_{j=1}^4 \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} (W_{i,j}^{meas} - W_{i,j}^{calc}(u, g) - A_j)^2 \right\} = \min. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь  $N, E$  – измеренные (meas) и вычисленные (calc) смещения в  $M$  пунктах GPS на север и восток,  $W_{i,1-4}$  – смещения в направлении на спутник с 4-х орбит, заданные соответственно в  $n_{i-4}$  точках, со своими нулевыми уровнями  $A_{i-4}$ . Поверхность разрыва аппроксимирована  $K = 48$  прямоугольными элементами. Каждый элемент определяется семью параметрами (две географические координаты и глубина одного из углов, размеры сторон, углы падения и простирания). Эти параметры последовательно записываются в вектор  $g = (g_l)$ , ( $l = 1, 2, \dots, 7K$ ). Вектор  $u = (u_D^1, \dots, u_D^K; u_S^1, \dots, u_S^K)$  содержит неизвестные смещения по падению –  $D$  и простиранию –  $S$  на каждом элементе плоскости. Относительно компонент вектора смещений задача является линейной.

Временные ряды GPS данных взяты с сайта UNAVCO<sup>3</sup>. Косейсмические смещения на пунктах GPS были рассчитаны как разница средних значений координат пунктов за 10 дней до и 10 дней после землетрясения.

Важно отметить, что, во-первых, для решения обратной задачи использовались поля смещений поверхности Земли, полученные в основном для “материковой части” очаговой области. Это обуславливается особенностями процедуры развертки фазы – фаза разворачивается некорректно, если на интерферограмме есть области, окруженные участками низкой когерентности (в данном случае большие площади водной поверхности, когерентность которых равна нулю). Это не позволило корректно оценить смещения на многочисленных островах. Во-вторых, область смещений землетрясения “Чигник” не покрывается одной парой снимков. Поэтому использовалось по четыре пары снимков, как с восходящей, так и с нисходящей орбиты. При этом программный пакет SARscape имеет функцию объединения радарных снимков, полученных последовательно с одной орбиты, что позволило уменьшить количество интерферограмм, каждая из которых обрабатывалась независимо. На выходе получилось, четыре файла значений смещений для двух восходящих и двух нисходящих орбит (см. рис. 2), каждый со своим средним и своей геометрией съемки. Этот факт был учтен при решении обратной задачи, введением дополнительных констант  $A_j$  (см. формулу (2)) для каждой интерферограммы.

Обратная задача определения смещений на сейсмическом разрыве по полям смещений, заданным на земной поверхности, является некорректно поставленной и требует применения регуляризации. В данной работе решение искалось под условием, что направление смещений на эле-

ментах поверхности разрыва близко к углу подвижки, определяемому выбранной нодальной плоскостью (NP1 из решения USGS). Это обеспечивалось добавлением в функционал (2) дополнительных условий со своими весами  $\beta$  и  $\gamma$ :

$$\beta \left\{ \sum_{j=1}^K [u_j^S \sin(\text{rake}) - u_j^D \cos(\text{rake})] \right\}^2 + \gamma \left\{ \left( \sum_{j=1}^K [u_j^S - \widehat{u}^S] \right)^2 + \left( \sum_{j=1}^K [u_j^D - \widehat{u}^D] \right)^2 \right\}, \quad (3)$$

где первый член задает близость направления подвижки на каждом элементе к заданной величине, а второй исключает неоднозначность такого условия, т.к. ему удовлетворяют два вектора с азимутами  $\alpha$  и  $\alpha + 180^\circ$  [Михайлов и др., 2020]. Средние значения смещений по простиранию и падению по всей плоскости обозначены  $\widehat{u}^S$  и  $\widehat{u}^D$ .

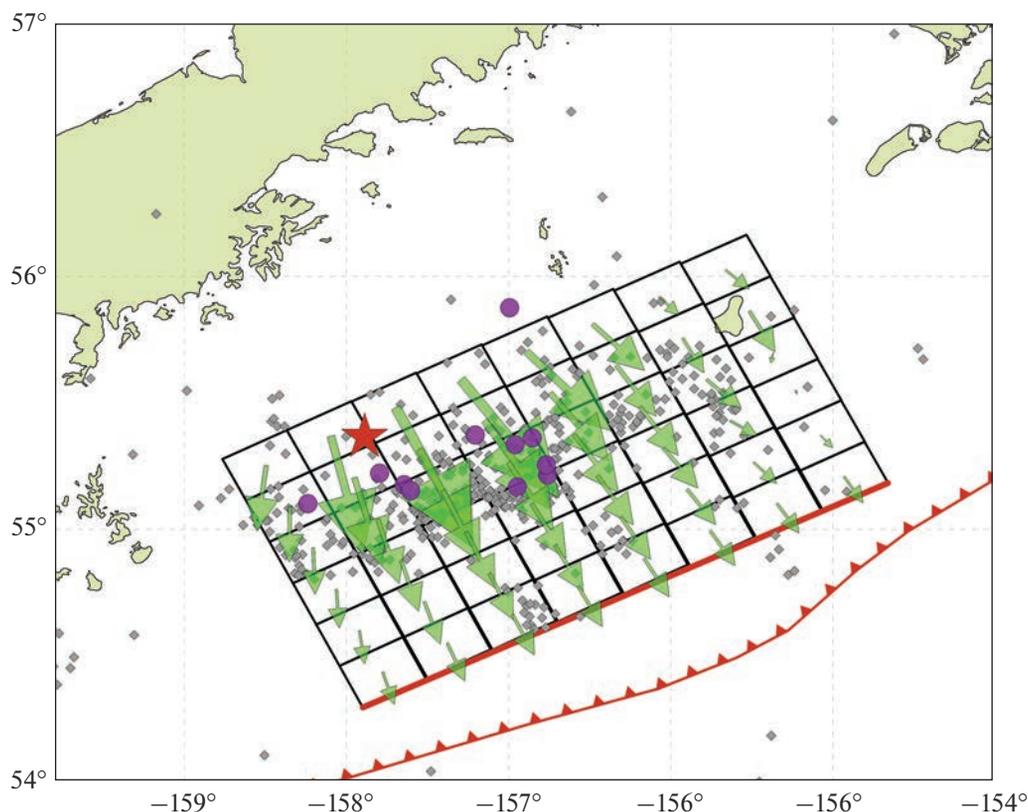
Путем решения обратной задачи была построена модель поверхности разрыва (рис. 4) со следующими параметрами: угол падения  $14^\circ$ , угол простирания  $243^\circ$ , размер по падению 126 км, по простиранию 225 км. Глубина нижней кромки 40.5 км, верхней – 10 км. Простирание, угол падения и угол подвижки также близки к параметрам одной из нодальных плоскостей GCMT-решения.

Максимальные смещения на поверхности разрыва в модели достигают 5.7 м при среднем смещении по всей плоскости 2.2 м. Сейсмический момент, рассчитанный при значении модуля сдвига 32 ГПа по полученным параметрам площадки и смещениям на ней, составил  $1.95 \times 10^{21}$  Н м, что соответствует значению  $M_w = 8.13$ , близкому к оценкам USGS и GCMT, полученным по сейсмологическим данным. В модели, опубликованной на сайте USGS, максимальное смещение составляет 5.55 м, а сейсмический момент равен  $2.36 \times 10^{21}$  Н м.

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Полученная модель поверхности разрыва аляскинского землетрясения “Чигник” не противоречит имеющимся данным геодинамики, сейсмологии и геодезии. Невязки в пунктах GPS не превосходят 8% в области основных смещений, а смещения в направлении на спутник практически идентичны в пределах точности входных данных – различия составляют первые сантиметры (рис. 5). Здесь уместно заметить, что точность подбора модели можно повысить до долей мм, путем увеличения числа элементов разбиения поверхности разрыва. Но хотя модель сферически расслоенной Земли точнее описывает реальное строение, чем модель однородного упругого полупространства, она не учитывает горизонтальные неоднородности. Поэтому нет оснований для

<sup>3</sup> <https://www.unavco.org/>



**Рис. 4.** Элементы модели поверхности сейсмического разрыва для землетрясения “Чигник”, Аляска, 29.07.2021, построенной по всему комплексу данных и содержащей 48 элементов.

Зеленые стрелки — смещения на поверхности разрыва, максимум которых равен 5.73 м, серые точки — афтершоки с магнитудой от 2.5 до 5, пурпурные круги — афтершоки с магнитудой более 5 по данным USGS. Красная звезда — эпицентр землетрясения. Красная линия с зубцами — положение оси океанического желоба. Верхняя грань поверхности модели показана красной линией. Верхние кромки каждого ряда элементов находятся на глубине 10.0, 15.1, 20.2, 25.3, 30.3, 35.4 км соответственно.

дальнейшего повышения детальности, которая не будет обеспечена ни точностью геодинамической модели, ни точностью исходных данных.

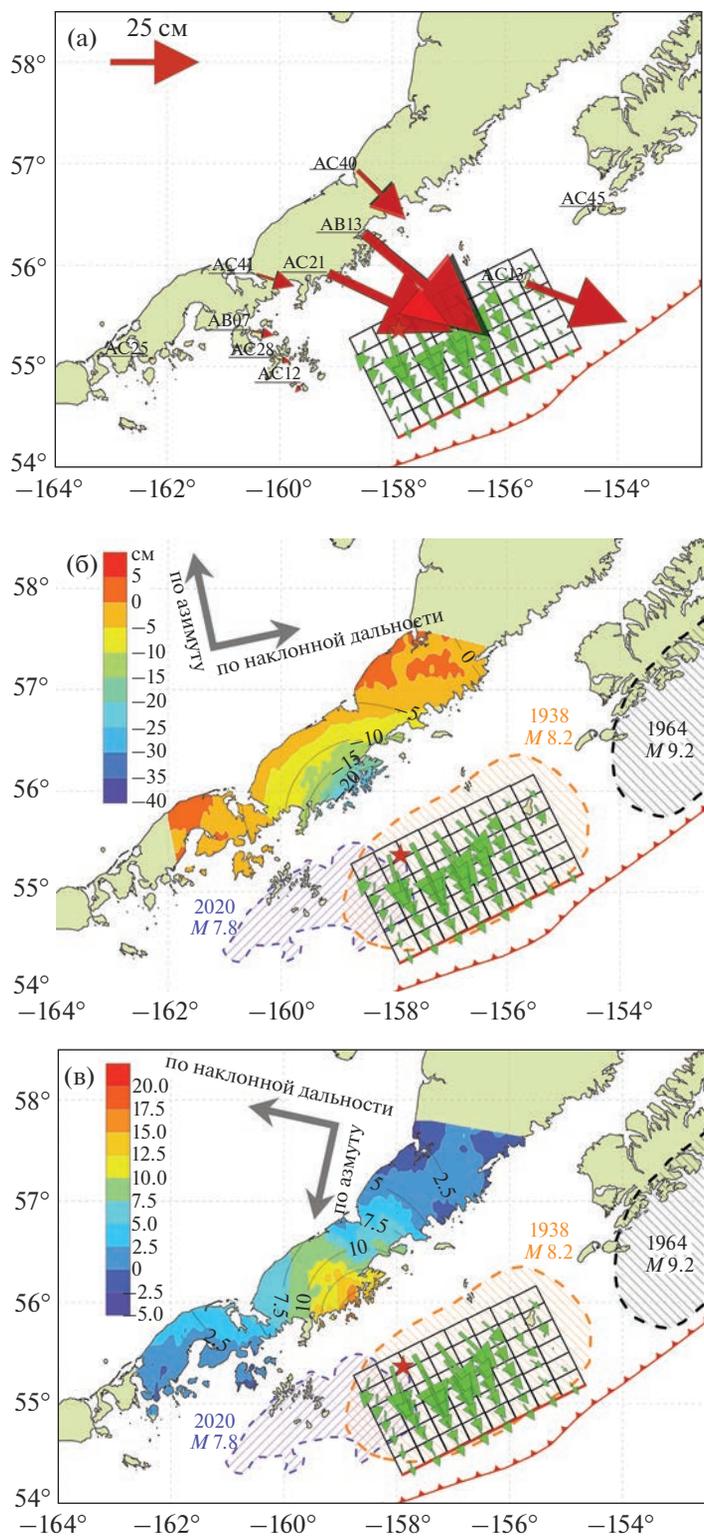
Преобладающий угол подвижки составил примерно  $90^\circ$  (надвиг) с небольшими отклонениями по краям плоскости, аппроксимирующей поверхность разрыва. Основные смещения произошли на глубинах 25–40 км, что хорошо согласуется с распределением афтершоков (см. рис. 4). Максимальные смещения в 5.7 м получены в ячейке с координатами центра  $55.481^\circ$  с.ш.  $157.695^\circ$  з.д.

На рис. 5а показано качество подбора данных GPS. Красные и черные стрелки, показывающие измеренные и расчетные смещения, почти полностью перекрываются. На рис. 5б и 5в сопоставлены смещения в направлении на спутник с восходящей и нисходящей орбит соответственно. Изолинии смещений, построенные по модели, с хорошей точностью соответствуют цветовой карте, построенной по данным интерферометрии.

Из рис. 5б и 5в следует, что очаговая область землетрясения “Чигник” почти полностью пере-

крывается с очаговой областью землетрясения 1938 г. с магнитудой 8.2. Наличие пробела между очаговыми областями этих землетрясений и областью Великого Аляскинского землетрясения 1964 г. на востоке вероятнее всего связано с невысокой точностью определения очага события 1964 г., которое произошло до появления детальных сейсмологических и геодезических сетей и спутниковых технологий.

В целом, модель поверхности разрыва, хоть и отличается в деталях от ранее представленных в литературе моделей, но совпадает с ними по основным параметрам. Все вышеупомянутые модели дают похожие пространственные распределения смещений на плоскости разрыва, но в моделях [Liu et al., 2022; Ye et al., 2022] максимальные смещения значительно больше (8.6 и 12.9 м соответственно). Хотя сами авторы работы [Ye et al., 2022] пишут, что пиковое значение смещений не является стабильной характеристикой модели, так как оно сильно зависит от её параметризации и сглаживания. Кроме того, при сопоставлении моделей поверхности разрыва землетрясений



**Рис. 5.** Модель поверхности разрыва землетрясения “Чигник”, Аляска, 29.07.2021. а – сравнение горизонтальных смещений на пунктах GPS (черные стрелки – измеренные смещения, красные – рассчитанные по модели). Максимальное смещение равно 46.13 см; б, в – сравнение смещений поверхности Земли в направлении на спутник для восходящей (б) и нисходящей (в) орбит. Цветом показаны смещения по радарным снимкам спутников Sentinel, изолиниями – рассчитанные по модели. Красная линия с зубцами – положение оси океанического желоба.

важно иметь в виду различия временных интервалов процессов, происходящих в очаге землетрясения. Сейсмологические построения выполняются на основе инверсии волновых форм и отражают только короткопериодный процесс вспарывания (десятки секунд). В то время как движения в очаговой зоне, моделируемые по данным РСА-интерферометрии, включают как косейсмические смещения в очаге, так и часть постсейсмических смещений, которые могут быть связаны с афтершоками и криповыми процессами [Михайлов и др., 2022].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как уже неоднократно было продемонстрировано, например, в работах [Михайлов и др., 2018, 2020, 2022], совместная интерпретация данных GPS и спутниковой радарной интерферометрии позволяет получить детальную информацию о геометрии поверхности сейсмического разрыва и о поле смещений на ней. В данной работе приведена модель поверхности разрыва для землетрясения “Чигник” (Аляска, США) 29.07.2021. При решении обратной задачи использовался метод регуляризации, впервые предложенный в работе [Михайлов и др., 2018]. Это исследование является еще одним подтверждением корректности такого метода.

К сожалению, для исследуемого землетрясения не представлялось возможным в полной мере раскрыть основное преимущество РСА-интерферометрии, а именно получение полей смещений земной поверхности непосредственно в эпицентральной области, так как гипоцентр землетрясения находился под континентальным шельфом. Тем не менее, полученная модель хорошо согласуется со всем комплексом имеющихся данных. Кроме того, использованное в работе решение для расслоенной сферической планеты позволяет более точно моделировать поля смещений, по сравнению с работами других авторов. Также следует принять во внимание различие в применяемых методах регуляризации. Условие близости угла подвижки к решению механизма очага основано на реальных данных, в отличие от формального условия гладкости поля смещений, применяемого в большинстве работ.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные радарные снимки спутников Sentinel-1A и 1B. Мы благодарим Консорциум Uplavco за предоставление доступа к записям станций GPS и Ф. Поллитца (USGS), который разработал программный код Static1D и сделал его доступным для научного сообщества.

## ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-17-00064, <https://rscf.ru/project/23-17-00064/>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Пономарев А.В., Дмитриев П.Н., Карташов И.М., Хайретдинов С.А., Арора К., Чадда Р., Шринагеш Д. Совместная интерпретация наземных и спутниковых данных для землетрясения Горха, Непал, 25.04.2015 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 119–127. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2018-15-4-119-127>
- Михайлов В.О., Тимошкина Е.П., Смирнов В.Б., Хайретдинов С.А., Дмитриев П.Н. К вопросу о природе постсейсмических деформационных процессов в районе землетрясения Мауле, Чили, 27.02.2010 г. // Физика Земли. 2020. № 6. С. 38–47. <https://doi.org/10.31857/S0002333720060046>
- 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. <https://doi.org/10.31857/S000233372020089>
- Ali S.T., Freed A.M. Contemporary deformation and stressing rates in Southern Alaska // Geophys. J. Int. 2010. V. 183. P. 557–571. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2010.04784.x>
- Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C. Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // Geochem. Geophys. Geosyst. 2011. V. 12. № 11. P. 1–13. <https://doi.org/10.1029/2011GC003751>
- Bürgmann R., Rosen P.A., Fielding E.J. Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth’s surface topography and its deformation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 2000. V. 28. P. 169–209. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.28.1.169>
- Costantini M., Rosen P.A. A generalized phase unwrapping approach for sparse data (IEEE 1999 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS’99 (Cat. No. 99CH36293)). Hamburg, Germany: IEEE, 1999. P. 267–269. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.773467>
- Cross R.S., Freymueller J.T. Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. № B7. P. 1–19. <https://doi.org/10.1029/2007JB005136>
- Davies J., Sykes L., House L., Jacob K. Shumagin seismic gap, Alaska Peninsula: History of great earthquakes, tectonic setting, and evidence for high seismic potential // J. Geophys. Res. 1981. V. 86. P. 3821–3855. <https://doi.org/10.1029/JB086iB05p03821>
- Drooff C., Freymueller J.T. New constraints on slip deficit on the Aleutian megathrust and Inflation at Mt. Veniaminof, Alaska from repeat GPS measurements // Geophys.

- Res. Lett. 2021. V. 48. № 4. P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1029/2020GL091787>
- Elliott J.L., Grapenthin R., Parameswaran R. M., Xiao Z., Freymueller J. T., Fusso L.* Cascading rupture of a megathrust // *Sci. Adv.* 2022. V. 8. № 18. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.abm4131>
- Ferretti A.* Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space. Bunnik, Netherlands: EAGE Publications, 2014. 159 p.  
<https://doi.org/10.3997/9789073834712>
- Freymueller J.T., Woodard H., Cohen S.C., Cross R., Elliott J., Larsen C.F., Hreinsdóttir S., Zweck C.* Active deformation processes in Alaska, based on 15 years of GPS measurements (Active Tectonics and Seismic Potential of Alaska. Geophys. Monogr. Ser., V. 179.). Washington, D. C., USA: AGU, 2008. 42 p.  
<https://doi.org/10.1029/179GM02>
- Goldstein R.M., Werner C.L.* Radar interferogram filtering for geophysical applications // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 4035–4038.  
<https://doi.org/10.1029/1998GL900033>
- Goldstein R.M., Zebker H.A., Werner C.L.* Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping // *Radio Sci.* 1988. V. 23. P. 713–720.  
<https://doi.org/10.1029/RS023I004P00713>
- 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>
- Hooper A., Segall P., Zebker H.* Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos // *J. Geophys. Res.* 2007. V. 112. № B7. P. 1–21.  
<https://doi.org/10.1029/2006JB004763>
- Liu C., Lay T., Xiong X.* The 29 July 2021  $M_w$  8.2 Chignik, Alaska Peninsula earthquake rupture inferred from seismic and geodetic observations: Re-rupture of the western 2/3 of the 1938 rupture zone // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49. № 4. P. 1–9.  
<https://doi.org/10.1029/2021JB023676>
- Okada Y.* Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1992. V. 82. P. 1018–1040.  
<https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>
- Okada Y.* Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1985. V. 75. P. 1135–1154.  
<https://doi.org/10.1785/BSSA0750041135>
- Pollitz F.F.* Coseismic deformation from earthquake faulting on a layered spherical Earth // *Geophys. J. Int.* 1996. V. 125. № 1. P. 1–14.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1996.tb06530.x>
- Suito H., Freymueller J.T.* A viscoelastic and afterslip post-seismic deformation model for the 1964 Alaska earthquake // *J. Geophys. Res.* 2009. V. 114. № B11. P. 1–23.  
<https://doi.org/10.1029/2008JB005954>
- Ye L., Bai Y., Si D., Lay T., Cheung K.F., Kanamori H.* Rupture model for the 29 July 2021  $M_w$  8.2 Chignik, Alaska earthquake constrained by seismic, geodetic, and tsunami observations // *J. Geophys. Res.* 2022. V. 127. № 7. P. 1–42.  
<https://doi.org/10.1029/2021JB023676>
- Ye L., Lay T., Kanamori H., Yamazaki Y., Cheung K.F.* The 22 July 2020  $M_w$  7.8 Shumagin seismic gap earthquake: partial rupture of a weakly coupled megathrust // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2021. V. 562. № 6A. P. 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/J.EPSL.2021.116879>

## Model of the Seismic Rupture Surface of the Chignik Earthquake (Alaska, USA) 07.29.2021 Based on SAR Interferometry and GNSS Data

A. M. Konvisar<sup>1, 2, \*</sup>, V. O. Mikhailov<sup>1</sup>, M. S. Volkova<sup>1</sup>, and V. B. Smirnov<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences,  
Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242 Russia*

<sup>2</sup>*Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University, Leninskie Gory, 1, bld. 2, Moscow, 119991 Russia*

\*e-mail: alexkonvisar@gmail.com

The paper presents a new rupture model for the  $M_w = 8.2$  “Chignik” earthquake, which occurred off the coast of the Alaska Peninsula on 29.07.2021. The model is based on the Earth’s surface displacement fields obtained by InSAR (Interferometric synthetic aperture radar) method using images of the ESA Sentinel-1 satellites from 17.07 to 10.08.2021 and data on horizontal displacements at nearest permanent GPS sites from 18.07 to 08.08.2021. Obtained displacement fields include both coseismic and part of postseismic displacements. When constructing a model of the seismic rupture surface, we used F. Pollitz’s solution of the problem of the displacement fields at the surface of a spherical radially stratified planet caused by displacements on a rectangular discontinuity located inside it. For the regularization of the inverse problem, we added the condition that the direction of slip on each element of the fault plane is close to the rake angle, determined from seismological data. In the constructed model, the seismic rupture area was approximated by a single plane with a length of 225 km along the strike, 126 km along the dip, divided into 48 identical rectangles. According to the constructed model, the type of displacements is almost pure thrust, and displacements, in general, occurred throughout all the source area. The maximum displacement was 5.7 m, with an average displacement over the entire plane of 2.2 m, which is close to the USGS and GCMT estimates derived from seismological data.

**Keywords:** earthquake, Alaska, USA, “Chignik”, July 27, 2021, SAR interferometry, displacement fields, GPS, inverse problem, seismic rupture model