

## ЭВОЛЮЦИЯ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ ЗЕМНОЙ КОРЫ КАК ВЕРОЯТНЫЙ ТРИГГЕР КАМЧАТСКОГО МЕГАЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В. И. Кафтан\*, П. А. Докукин

*Геофизический центр Российской академии наук, Москва, Россия*

*\*E-mail: v.kaftan@gcras.ru*

Геодезические непрерывные наблюдения на ГНСС станциях, расположенных в сейсмоактивных регионах, на протяжении последних десятилетий активно используются для изучения современных движений и деформаций земной коры. При этом часто обнаруживаются аномальные деформации, развивающиеся в пространстве и времени согласованно с характером хода региональной сейсмичности. Особый интерес возникает при изучении эволюции горизонтальной деформации полного сдвига. Эта характеристика часто проявляется в виде триггерного воздействия на подготовленный сейсмический очаг. Отследить закономерности сейсмодеоформационного процесса позволяют специально создаваемые кинематические визуализации, синоптический анализ которых обеспечивает проверку тех или иных гипотез взаимосвязи деформаций и сейсмической активности. Первый случай перемещения аномальной горизонтальной деформации сдвига к поверхностной части очага будущего сильного землетрясения был обнаружен в связи с землетрясением Напа (август 2014 г., М6.0). Бегущая аномалия возникла в эпицентре пары умеренных землетрясений и переместилась примерно на 200 км за 9 лет, последовательно сопровождаясь сильным и умеренным событиями, по мере контакта ее фронта с областями будущих эпицентральных зон. Аналогичное развитие деформации полного сдвига было зарегистрировано в регионах западного побережья Северной Америки, Восточной Турции, Эгейского моря, Новой Зеландии, Японского архипелага и Тайваня. Исследования показали, что плотные сети ГНСС обеспечивают наилучшее пространственное разрешение синоптических визуализаций.

Одно из сильнейших землетрясений за историческое время с М8.8 произошло 29 июля 2025 г. в акватории Тихого океана в сотне км от Петропавловска-Камчатского. Гипоцентр располагался на глубине 35 км. Несмотря на то, что в регионе крайне мало станций непрерывных ГНСС наблюдений, была предпринята попытка исследования современных движений и деформаций земной коры в условиях редкой контрольной сети, состоящей из 22 станций. Расстояния между станциями изменялись от сотен до первых тысяч км. Тем не менее, конечные элементы анализа деформаций – треугольники триангуляции Делоне покрыли область распространения сейсмического разрыва, что позволило достаточно надежно отследить пространственно-временную эволюцию движений и деформаций земной коры на интервале 5 лет перед сильнейшим событием. Эволюция деформации полного сдвига представлена на видео по ссылке <https://esdb.gcras.ru/doi/2025/esdb-kamchatka-tss-2025/esdb-kamchatka-tss-2025.mp4>.

Первое сильное землетрясение М7 произошло в феврале 2020 г. в районе о-ва Утуруп. Наиболее интересно, что с этого времени началась активизация слабых и умеренных событий, завершившаяся более мощным землетрясением с М7.5 именно там, куда через пять лет с северо-востока примкнуло южное окончание сейсмического разрыва Камчатского мегаземлетрясения М8.8. Т.е. эта «клавиша уже сыграла свою ноту», ожидая продолжения «мелодии». Далее активизация слабых и умеренных событий началась преимущественно в юго-западной части Курило-Камчатский дуги. Здесь начала устойчиво развиваться аномалия полного сдвига, начиная с  $2.5 \cdot 10^{-7}$ . На северо-востоке плотность эпицентров развивалась менее интенсивно. В первые годы пятилетней прелюдии эта сдвиговая аномалия продолжала расширяться. Через полтора года образовался ее экстремум на севере в районе о-ва Беринга, где примерно через год произошло землетрясение с М6 и начала развиваться северная аномалия меньшей амплитуды, чем южная. В это время в будущей эпицентральной зоне Камчатского мегаземлетрясения сохранялось деформационное «молчание». В этой зоне за год до главного события произошло сильное землетрясение М7 и его афтершоки изменили положение изолинии окраины аномальной зоны. С 20 по 29 июля в эпицентральной зоне будущего мегасобытия произошло четыре форшока с М6.6–7.4 и рой умеренных. Мегаземлетрясение объединило две аномальных области деформации воедино, не противореча гипотезе о ее триггерном воздействии на подготовленный очаг.

## EVOLUTION OF SHEAR DEFORMATION OF THE EARTH'S CRUST AS A PROBABLE TRIGGER OF THE KAMCHATKA MEGATHRUST EARTHQUAKE

V. I. Kaftan\*, P. A. Dokukin

*Geophysical Center of the Russian academy of Sciences, Moscow, Russia*

*\*E-mail: v.kaftan@gcras.ru*

Continuous geodetic observations at GNSS stations located in seismically active regions have been actively used over the past decades to study recent crustal movements and deformations. Anomalous deformations are often detected, evolving in space and time in concert with the pattern of regional seismicity. Of particular interest is the study of the evolution of. The horizontal total shear strain often manifests itself as a triggering effect on a prepared seismic source. Specially created kinematic visualizations allow for tracking patterns in the seismic deformation process. Synoptic analysis of these visualizations enables the verification of various hypotheses regarding the relationship between deformations and seismic activity. The first instance of anomalous horizontal strike-slip deformation moving toward the surface of a future strong earthquake's focus was detected in connection with the Napa earthquake (August 2014, M6.0). The traveling anomaly originated at the epicenter of a pair of moderate earthquakes and moved approximately 200 km over 9 years. Similar developments of full-slip deformation have been recorded in other regions.

One of the strongest historical earthquakes M8.8 occurred on July 29, 2025. Despite the extremely limited number of continuous GNSS observation stations in the region, an attempt was made to study recent crustal movements and deformations. Nevertheless, the finite elements of deformation analysis—Delaunay triangulation triangles—covered the seismic rupture distribution, allowing for a fairly reliable tracing of the spatiotemporal evolution of crustal movements and deformations over a five-year period prior to the strongest event. The evolution of the stain is presented in the video at the link <https://esdb.gcras.ru/doi/2025/esdb-kamchatka-tss-2025/esdb-kamchatka-tss-2025.mp4>

The first strong M7 earthquake occurred in February 2020 near Uturup Island. Most interestingly, from that time onward, weak and moderate events began to intensify, culminating in a more powerful M7.5 earthquake precisely where, five years later, the southern end of the seismic rupture of the Kamchatka M8.8 megathrust earthquake would join from the northeast. In other words, this «key had already played its note», awaiting the continuation of the «melody». Subsequently, weak and moderate events began to intensify primarily in the southwestern part of the Kuril-Kamchatka arc. Here, a total strike-slip anomaly began to develop steadily, starting at  $2.5 \cdot 10^{-7}$ . During the first years of the five-year prelude, this strike-slip anomaly continued to expand. About a year later, an M6 earthquake occurred there, and a northern anomaly of smaller amplitude than the southern one began to develop. During this time, deformational «silence» persisted in the future epicentral zone of the Kamchatka megathrust earthquake. A year before the main event, a strong M7 earthquake occurred in this zone, and its aftershocks shifted the contour of the anomaly's margin. From July 20th to 29th, four foreshocks with magnitudes of M6.6–7.4 and a swarm of moderate ones occurred in the epicentral zone of the future mega-earthquake. The mega-earthquake merged two anomalous deformation zones, consistent with the hypothesis of its triggering effect on a pre-existing source