

Динамика земных покровов южной части полуострова Камчатка в ходе землетрясения 30 июля 2025 года по данным PCA Sentinel-1

Л. Н. Захарова, А. И. Захаров

*Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

Релаксация накопленного тектонического напряжения вблизи зоны субдукции Тихоокеанской плиты во время землетрясения 30 июля 2025 г. привела к заметному смещению земных покровов на юго-восточной части полуострова Камчатка. В настоящей работе методами космической радарной интерферометрии выполнены измерения горизонтальных и вертикальных смещений земной поверхности к югу от Петропавловска-Камчатского. В обработке использованы интерферометрические пары снимков, сделанные радиолокатором с синтезированной апертурой Sentinel-1 с восходящих и нисходящих витков орбиты космического аппарата. Благодаря интерферометрическим измерениям вариаций наклонной дальности за время между съёмками сделаны оценки радиальных смещений и построены карты горизонтальных и вертикальных подвижек отражающих покровов в результате землетрясения 30 июля 2025 г. Максимальное горизонтальное смещение величиной 1,7 м с просадками 0,2 м наблюдалось на восточном побережье южной оконечности полуострова.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, интерферометрия, разлом, землетрясение, смещения поверхности

Одобрена к печати: 04.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-444-448

Полуостров Камчатка находится в одном из наиболее сейсмически активных регионов — вблизи зоны субдукции, где Тихоокеанская литосферная плита поддвигается под Охотскую континентальную плиту в северо-западном направлении со скоростью примерно 80 мм в год. Релаксация накопленного тектонического напряжения в результате скачкообразного взаимного проскальзывания литосферных плит в зоне разломов, сопровождаемая землетрясениями, проявляется в виде смещений земной поверхности. Мегаземлетрясение 30 июля 2025 г. на Камчатке магнитудой 8,8 с эпицентром в 150 км к юго-востоку от Петропавловска-Камчатского вошло в десятку сильнейших за историю инструментальных наблюдений (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000qw60/executive>).

Спутниковая радиолокационная интерферометрия уже более 30 лет является инструментом, удобным для наблюдения смещений подстилающей поверхности суши вследствие различных природных явлений (Forster et al., 2003; Fruneau et al., 1996; Izumi et al., 2021; Strozzi et al., 2003), в том числе и землетрясений (Li et al., 2023; Massonnet et al., 1993). Особенностью радиолокационной интерферометрии представляется чувствительность фазовых измерений на интерферограмме к изменениям радиального расстояния от антенны радара до отражающей поверхности за время между съёмками интерферометрической пары снимков. При наличии пар радиолокационных снимков объекта с различных сторон можно выделить горизонтальные и вертикальные компоненты смещений, как, например, это сделано в работе (Захарова и др., 2025) для оползневых участков на склонах Памира. Благодаря регулярным радиолокационным наблюдениям земной поверхности радаром С-диапазона спутника Sentinel-1 оказалось возможным оценить степень деформации земной поверхности южной части полуострова Камчатка в результате события 30 июля 2025 г.

Для разложения радиального смещения на горизонтальную (в направлении восток—запад) и вертикальную компоненту выбраны следующие пары данных с противоположных витков спутника, охватывающие основное событие, произошедшее в 11:25 местного времени 30 июля 2025 г. Снимки с нисходящего витка (трек 60 по условной нумерации)

спутника Sentinel-1 были сделаны радаром с синтезированной апертурой (РСА) 19 и 31 июля вечером по времени UTC (*англ.* Coordinated Universal Time) (утром 20 июля и 1 августа по местному времени соответственно), а снимки с восходящего витка с условным номером 111 сделаны 23 июля и 4 августа (7:40 UTC, 19:40 местного времени). Границы кадров съёмки с восходящего и нисходящего витка спутника показаны на *рис. 1* белыми рамками. Протяжённость общей части кадров с севера на юг — более 300 км.

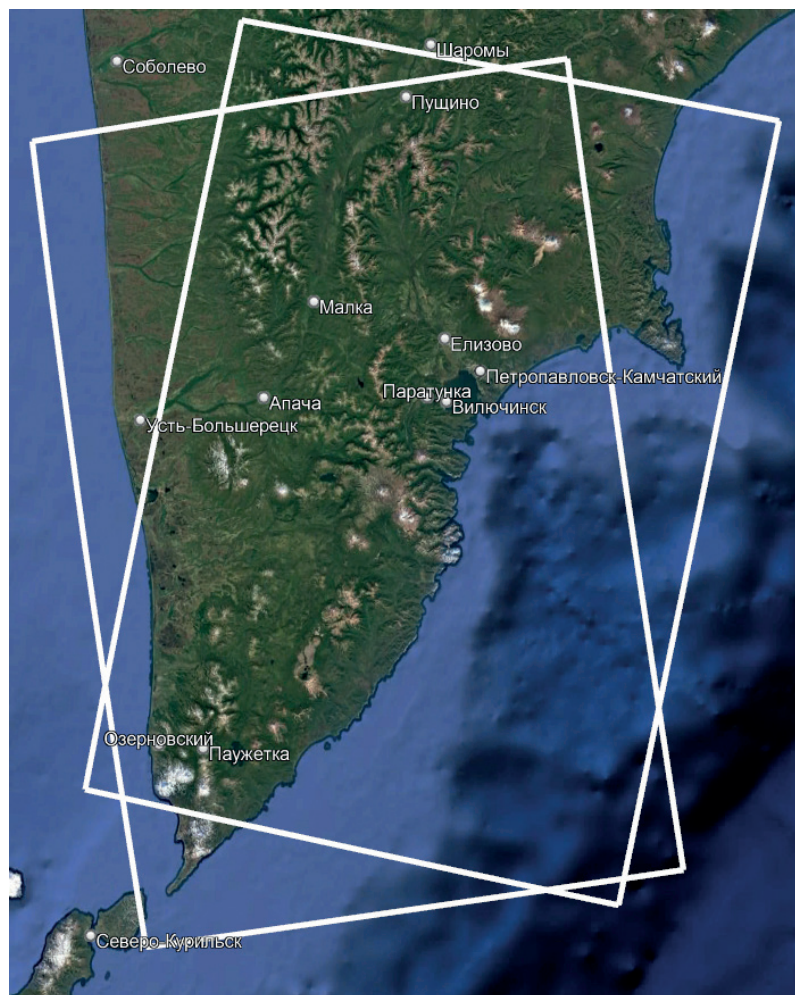


Рис. 1. Расположение использованных в обработке кадров съёмки РСА Sentinel-1

Результаты совместной обработки двух интерферограмм с восходящего и нисходящего витка для общей области кадров с *рис. 1* приведены на *рис. 2* (см. с. 446). Слева (см. *рис. 2а*) в цветовой кодировке дана карта горизонтальных смещений поверхности, а справа (см. *рис. 2б*) — вертикальных. Зелёному цвету соответствуют стабильные участки поверхности с околонулевыми значениями смещения. Цветовая шкала на *рис. 2а* даёт соответствие между цветом и величиной смещения для обоих направлений смещения. Смещениям на восток на 1,5 м и более соответствует тёмно-красный цвет. На карте горизонтальных смещений максимальные величины, достигающие 1,7 м, наблюдаются на побережье в южной части фрагмента, они плавно уменьшаются до нуля в северо-западном направлении, быстрее всего спадая в направлении, перпендикулярном линии разрыва, расположенной параллельно берегу в морской акватории в 150 км к юго-востоку. Соответствующий график смещений по линии АБ с *рис. 2а* приведён на *рис. 3а* (см. с. 446). Измеренные сдвиги на *рис. 3* показаны чёрной линией, а аппроксимация обратным полиномом — синей.

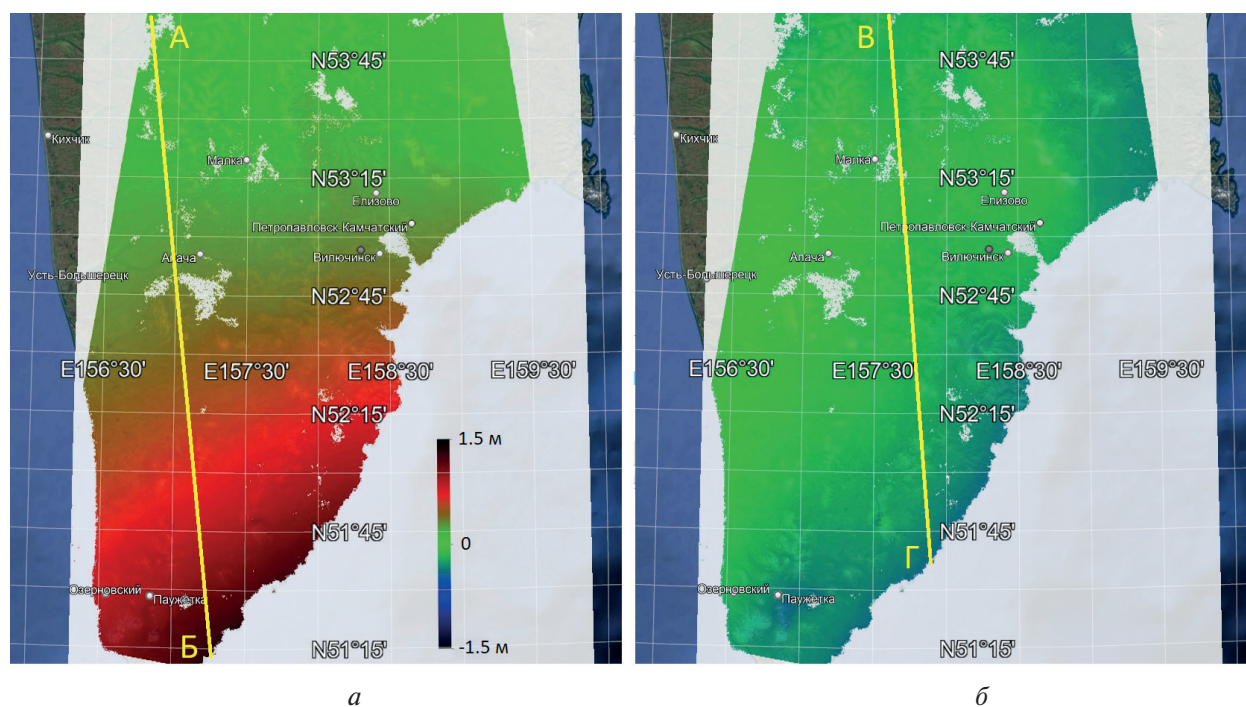


Рис. 2. Карты горизонтального (а) и вертикального (б) смещения участков поверхности южной оконечности полуострова Камчатка; АБ и ВГ — положение профилей для рис. 3

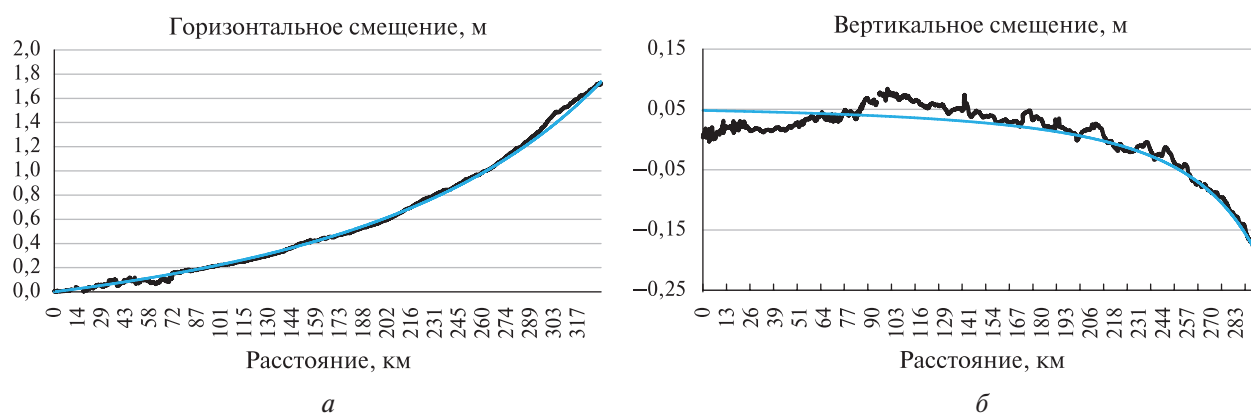


Рис. 3. Измеренное смещение земной поверхности: а — горизонтальное вдоль профиля АБ; б — вертикальное вдоль профиля ВГ

Вертикальная компонента смещения заметно меньше по величине. Как видно на рис. 2б, она проявляется ближе к берегу аквамариновым цветом. Профиль вертикальных смещений вдоль линии ВГ приведён на рис. 3б. Максимальное вертикальное смещение (проседание поверхности) здесь составляет 20 см относительно участка поверхности, удалённого приблизительно на 300 км к северу. При такой небольшой величине смещения на удалении от восточного побережья сказываются другие эффекты, влияющие на интерферометрическую фазу, и становятся заметными отклонения от линии аппроксимации на ± 5 см.

В максимальное двумерное смещение горизонтальная составляющая вносит наиболее значительный вклад, так как $\sqrt{1,7^2 + 0,2^2} \approx 1,7$ м. Имея измерения смещений на суше и упомянутую выше аппроксимацию (спадание эффекта при удалении от источника деформаций как $\sim 1/R^3$, где R — расстояние до линии разрыва), дополнительно можно оценить, каких величин могут достигать смещения на подводной части плиты вблизи линии разрыва. Для этого экстраполируем аппроксимацию по градиенту в сторону океана на расстояние 150 км

от берега. Это даст к полученным 1,7 м на суше дополнительное смещение на 10,2 м. Таким образом, при обратном кубическом законе спадания величин деформаций максимальное смещение края Охотской плиты вблизи зоны разлома составляет по данным радарной интерферометрии 11,9 м. Заметим, что это первое грубое приближение не учитывает изменение направления смещений при приближении к линии разрыва.

Недостатком радиолокационных интерферометрических наблюдений в С-диапазоне является влияние тропосферы (Delacour et al., 1998), вследствие чего возможны ошибки измерений радиальных смещений в областях пересечённого рельефа в зависимости от величины вариаций высоты рельефа и степени изменения параметров атмосферы. Для верификации полученных измерений нами была проведена аналогичная обработка снимков Sentinel-1 для интервала времени, не включавшего момент землетрясения: 31 июля – 12 августа и 4–16 августа. На этих картах (не приводимых в кратком сообщении) отсутствует какое-либо заметное горизонтальное перемещение береговых участков поверхности, а вертикальные перемещения укладываются в диапазон первых сантиметров, что вполне может быть объяснено влиянием неоднородностей тропосферы и вариациями вертикального профиля коэффициента преломления в атмосфере за время между съёмками интерферометрических пар (Захаров и др., 2023).

Таким образом, интерферометрические измерения позволили сделать вывод о площадном смещении Охотской литосферной плиты вблизи области субдукции, достигающем на юго-восточном побережье полуострова Камчатка величины 1,7 м по горизонтали и 0,2 м по вертикали, которое явилось результатом землетрясения 30 июля 2025 г.

Работа выполнена в рамках госзадания ИРЭ им. В. А. Котельникова РАН

Литература

1. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Синило В. П., Денисов П. В. Влияние атмосферы на исследования пересечённого рельефа методами радарной интерферометрии // Журн. радиоэлектроники. 2023. № 2. 14 с. DOI: 10.30898/1684-1719.2023.2.6.
2. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Стром А. Л. Развитие склоновых процессов в головной части Сарезского озера в 2023 году по данным космической радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 43–55. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-43-55.
3. Delacourt C., Briole P., Achache J. Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. P. 2849–2852. DOI: 10.1029/98GL02112.
4. Forster R., Jezek K., Koenig L., Deeb E. Measurement of glacier geophysical properties from InSAR wrapped phase // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 11. P. 2595–2604. DOI: 10.1109/TGRS.2003.815413.
5. Fruneau B., Achache J., Delacourt C. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry // Tectonophysics. 1996. V. 265. P. 181–190.
6. Izumi Y., Frey O., Baffelli S. et al. Efficient approach for atmospheric phase screen mitigation in time series of terrestrial radar interferometry data applied to measure glacier velocity // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2021. V. 14. P. 7734–7750. DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3099873.
7. Li Z., Xu S.-S., Ma Z.-F. Space geodetic views on the 2021 Central Greece earthquake sequence: 2D deformation maps decomposed from multi-track and multi-temporal Sentinel-1 InSAR data // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 2023. V. 16. P. 2741–2752. DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3257234.
8. Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaut T. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry // Nature. 1993. V. 364. P. 138–142.
9. Strozzi T., Wegmüller U., Werner C. L. et al. JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 7. P. 1702–1708. DOI: 10.1109/TGRS.2003.813273.

Land cover dynamics in the southern part of Kamchatka Peninsula during the July 30, 2025, earthquake according to Sentinel-1 SAR data

L. N. Zakharova, A. I. Zakharov

*Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

Relaxation of the accumulated tectonic stress near the Pacific Plate subduction zone during the July 30, 2025, earthquake resulted in a significant land-surface shift on the southeastern coast of the Kamchatka Peninsula. In this study, spaceborne radar interferometry technique was used to measure horizontal and vertical land surface displacements south of Petropavlovsk-Kamchatsky. Interferometric pairs of images acquired by the Sentinel-1 synthetic aperture radar from the satellite ascending and descending orbits were used in the study. Due to the interferometric measurements of the slant range variations between images, the radial displacements were estimated and the maps of horizontal and vertical displacements of the scattering covers following the July 30, 2025, earthquake were formed. The maximum horizontal land surface displacement of 1.7 m with 0.2 m subsidence was observed on the eastern coast of the southern tip of the peninsula.

Keywords: synthetic aperture radar, interferometry, fault, earthquake, surface displacements

Accepted: 04.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-444-448

References

1. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Sinilo V. P., Denisov P. V., An impact of the atmosphere on the studies of rugged terrain by radar interferometry techniques, *Zhurnal radioelektroniki*, 2023, No. 2, 14 p. (in Russian), DOI: 10.30898/1684-1719.2023.2.6.
2. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Strom A. L., Development of slope processes in the vicinity of the Sarez Lake dam in 2023 as viewed by spaceborne SAR interferometry, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 43–55 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-43-55.
3. Delacourt C., Briole P., Achache J., Tropospheric corrections of SAR interferograms with strong topography: application to Etna, *Geophysical Research Letters*, 1998, V. 25, pp. 2849–2852, DOI: 10.1029/98GL02112.
4. Forster R., Jezek K., Koenig L., Deeb E., Measurement of glacier geophysical properties from InSAR wrapped phase, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, No. 11, pp. 2595–2604, DOI: 10.1109/TGRS.2003.815413.
5. Fruneau B., Achache J., Delacourt C., Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry, *Tectonophysics*, 1996, V. 265, pp. 181–190.
6. Izumi Y., Frey O., Baffelli S. et al., Efficient approach for atmospheric phase screen mitigation in time series of terrestrial radar interferometry data applied to measure glacier velocity, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2021, V. 14, pp. 7734–7750, DOI: 10.1109/JSTARS.2021.3099873.
7. Li Z., Xu S.-S., Ma Z.-F., Space geodetic views on the 2021 Central Greece earthquake sequence: 2D deformation maps decomposed from multi-track and multi-temporal Sentinel-1 InSAR data, *IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2023, V. 16, pp. 2741–2752, DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3257234.
8. Massonnet D., Rossi M., Carmona C., Adragna F., Peltzer G., Feigl K., Rabaute T., The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 1993, V. 364, pp. 138–142.
9. Strozzi T., Wegmuller U., Werner C. L. et al., JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2003, V. 41, No. 7, pp. 1702–1708, DOI: 10.1109/TGRS.2003.813273.