Деформации участка Байкало-Амурской магистрали в районе Северомуйского тоннеля: результаты интерферометрии методом постоянных рассеивателей по данным Sentinel-1

Т. Н. Чимитдоржиев, А. В. Дмитриев, П. Н. Дагуров

*Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия
E-mail: tchimit@gmail.com*

Обнаружены деформации поверхности на участке Байкало-Амурской магистрали (БАМ) в районе Северомуйского тоннеля. Измерения выполнены методом радиолокационной интерферометрии постоянных рассеивателей (PSI) с использованием мультिवременных данных космического радиолокатора с синтезированной апертурой Sentinel-1 за 2017–2020 гг. Пространственные базовые линии между орбитами спутника не превышали ± 90 м, а временные базовые линии составляли 12–732 дня относительно реперного мастер-изображения, полученного 03.06.2019. Для устранения фазовых ошибок из-за снежного покрова и морозного пучения почвы были взяты данные бесснежных периодов; всего было использовано 32 изображения Sentinel-1B в режиме IW. Для исследуемого участка получена карта постоянных рассеивателей, описывающая скорость деформации поверхности. Максимальные скорости деформации, выявленные методом постоянных рассеивателей, составляют 27 мм/год вдоль линии зондирования.

Ключевые слова: деформации участка БАМ, радиолокационная интерферометрия, постоянные рассеиватели

Одобрена к печати: 01.07.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-320-324

Дистанционное зондирование Земли в настоящее время широко используется для мониторинга различных процессов и оценки последствий природных и техногенных аварий и катастроф (Бондур и др., 2009; Трошко и др., 2020). С увеличением международной спутниковой группировки, предоставляющей в свободном доступе данные высокого разрешения в режиме, близком к реальному времени, возникает возможность развития технологий космического мониторинга для прогнозирования и предотвращения возможных чрезвычайных ситуаций.

Важнейший объект инфраструктуры страны — железная дорога. Деформации земляного полотна и прилегающих к нему территорий могут быть исследованы с помощью современной технологии спутниковой радиолокации: интерферометрии постоянных рассеивателей (*англ.* persistent scatterer interferometry — PSI) (Crosetto et al., 2016). Такие исследования, например, актуальны в связи с разработкой планов по расширению Байкало-Амурской магистрали (БАМ) и Транссибирской магистрали (Транссиб). Цель настоящего сообщения заключается в демонстрации возможности выявления деформаций земной поверхности и вероятных деформаций земляного полотна железной дороги на участке БАМ в районе Северомуйского тоннеля методом PSI. Отметим, что ранее измерения деформаций вблизи трассы БАМ были выполнены методом обычной интерферометрии (Lebedeva et al., 2016). Исследования оползневой процесса вблизи ст. Казанкан показали значительные подвижки величиной 6 см за двухлетний период 2007–2009 гг.

Материалом исследований с помощью PSI служили мультिवременные снимки спутникового радара С-диапазона Sentinel-1, находящиеся в свободном доступе. Метод PSI за счёт интерферометрического анализа подвижек множества высококогерентных постоянных рассеивателей (*англ.* persistent scatterers — PS) существенно увеличивает точность измерения деформаций по сравнению с обычной дифференциальной интерферометрией, основанной на анализе пары изображений. В последнее время данные Sentinel-1 в сочетании с использованием PSI находят широкое применение для изучения различных деформационных процессов (Смолянинова и др., 2017; Филатов, 2017).

а

б

Рис. 1. Район исследований: а — местоположение участка и расположение всех PS; б — карта расположения PS со скоростями смещений $\pm(10-25)$ мм/год

Для устранения ошибок, связанных с влиянием на фазу радарного сигнала снежного покрова (Dagurov et al., 2020), были взяты данные бесснежных периодов; всего было использовано 32 изображения Sentinel-1B, полученных в режиме IW (англ. Interferometric Wide Swath) на нисходящей относительной орбите № 91 с 03.06.2017 по 03.09.2020 на согласованной вертикальной поляризации (излучение и приём вертикально-поляризованных радарных волн). Для исходных данных с целью устранения спекл-шума проводилась процедура некогерентного накопления. В результате пространственное разрешение (размер пикселя) составило 13,9 м как по азимуту, так и по горизонтальной дальности. Периодичность съёмки земной поверхности радаром Sentinel-1B в данном районе составляет 12 сут. Пространственные базовые линии между орбитами спутника не превышали ± 90 м, а временные базовые линии находились в пределах 12–732 дня относительно реперного мастер-изображения, полученного 05.06.2019. Интерферометрическая обработка данных Sentinel-1 проводилась с помощью программного пакета SARscape 5.4 со стандартными настройками Sentinel TOPSAR. Количество полученных PS в среднем составило более 1000 на 1 км².

Рис. 2. Временные серии смещений вдоль линии зондирования для PS-1 и PS-2 (врезка на рис. 1б)

На рис. 1а (см. с. 321) красным пунктирным прямоугольником показано географическое местоположение исследуемого участка, на врезке — карта расположения PS, скорости смещения которых обозначены различными цветами. Пунктирной линией на рис. 1а обозначен Северомуйский тоннель. Большинство из этих PS в исследуемом интервале времени показывают скорости смещения в пределах $-10...+10$ мм/год (зелёный цвет). Далее рассматриваем только деформации со скоростью более ± 10 мм/год (рис. 1б). Скорости смещения измерены вдоль линии радарного зондирования (угол падения равен 39°) и обозначены различным цветом: красные треугольники (отрицательные значения) относятся к движению от спутника, а синие (положительные значения) — движение к спутнику. Считается, что точность относительных измерений этим методом составляет 2–3 мм, однако в некоторых случаях (высококачественные PS, минимальные атмосферные эффекты и т.д.) удаётся достичь субмиллиметровой точности (Crosetto et al., 2016). На рис. 2 показаны скорости смещений на примере разнонаправленных постоянных рассеивателей PS-1 и PS-2, указанных на врезке рис. 1б (подложка — карта Яндекс). Результаты измерений, приведённые к дате первого из анализируемых снимков 03.06.2017, показывают очевидный линейный тренд со скоростями деформаций $+20$ мм/год для PS-1 и -18 мм/год для PS-2. Максимальные скорости деформации, выявленные методом постоянных рассеивателей, составляют 27 мм/год для PS-1 и 22 мм/год по абсолютной величине для PS-2 вдоль линии зондирования. Необходимо отметить, что для наблюдения за движением земной поверхности был создан Северомуйский геодинамический полигон (Басманов, 2015), однако в доступной литературе современные данные наземных измерений не найдены.

Таким образом, представленные результаты показали возможность применения дистанционного зондирования в виде радарной интерферометрии постоянных рассеивателей для выявления деформаций земной поверхности в районе Северомуйского тоннеля.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физического материаловедения СО РАН.

Литература

1. *Басманов А. В.* Геодезический мониторинг Байкальского геодинамического полигона Росреестра // Вестн. Сибирского гос. ун-та геосистем и технологий. 2015. № 2(30). С. 48–54.
2. *Бондур В. Г., Крапивин В. Ф., Савиных В. П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М.: Науч. мир, 2009. 692 с.
3. *Смолянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н.* Изучение и мониторинг зон проседания в Имеретинской низменности (район Большого Сочи) методом РСА-интерферометрии с использованием разночастотных спутниковых радарных снимков за период 2007–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-17-5-103-113.
4. *Трошко К. А., Денисов П. В., Лаврова О. Ю., Лупян Е. А., Медведев А. А.* Наблюдение загрязнений реки Амбарной, возникших в результате аварии на ТЭЦ-3 города Норильска 29 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 267–274. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-267-274.
5. *Филатов А. В.* Оценка вертикальных и горизонтальных смещений хвостохранилища Кольской ГМК по данным спутниковой радиолокационной съемки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 77–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85.
6. *Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B.* Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 115. P. 78–89. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
7. *Dagurov P. N., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I.* Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment // Intern. J. Remote Sensing. 2020. V. 41. No. 24. P. 9328–9359. DOI: 10.1080/01431161.2020.1798551.
8. *Lebedeva M. A., Sankov V. A., Zakharov A. I., Zakharova L. N.* Surface deformations near the Baikal-Amur railway from differential SAR interferometry data // Geodynamics and Tectonophysics. 2016. V. 7. No. 2. P. 315–328. DOI: 10.5800/GT-2016-7-2-0209.

Deformations of the Baikal-Amur Railway section at the Severomuisk tunnel: Results of persistent scatterer interferometry using Sentinel-1 data

T. N. Chimitdorzhiev, A. V. Dmitriev, P. N. Dagurov

*Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: tchimit@gmail.com*

Surface deformations on the section of the Baikal-Amur Railway in the area of the Severomuisk tunnel were found. The measurements were carried out by the remote sensing technique called Persistent Scatterer Interferometry (PSI). We used multi temporal data of the Sentinel-1 synthetic aperture space radar from 2017 to 2020. The spatial baselines between the orbits of the satellite did not exceed ± 90 m, and the time baselines were 12–732 days relative to the reference master image obtained on 03.06.2019. Data from snowless periods were used to eliminate phase errors caused by the snow cover and frost

heaving of the soil. Thirty two Sentinel-1B images were used in IW mode. A map of persistent scatterers describing the rate of surface deformation is obtained for the studied area. The maximum deformations rates detected by the persistent scatterers technique is equal to 27 mm/year along the radar line of sight.

Keywords: railway deformations, radar interferometry, persistent scatterers

Accepted: 01.07.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-320-324

References

1. Basmanov A. V., Geodetic monitoring of Rosreestr Baikal geodynamic testing area, *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta geosistem i tekhnologii*, 2015, No. 2(30), pp. 48–54 (in Russian).
2. Bondur V. G., Krapivin V. F., Savinykh V. P., *Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof* (Monitoring and forecasting of natural disasters), Moscow: Nauchnyi mir, 2009, 692 p. (in Russian).
3. Smolianinova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., Subsidence monitoring in the Imereti Lowland (the Big Sochi region) using multifrequency InSAR data for 2007–2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 103–113 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
4. Troshko K. A., Denisov P. V., Lavrova O. Yu., Loupian E. A., Medvedev A. A., Observation of the Ambar-naya River pollution resulting from the accident at the Norilsk Thermal Power Plant No. 3 on May 29, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 267–274 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-267-274.
5. Filatov A. V., Estimation of vertical and horizontal displacements at Kolskaya GMK tailing dam using SAR data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 7, pp. 77–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-77-85.
6. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B., Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 115, pp. 78–89, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
7. Dagurov P. N., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dobrynin S. I., Estimation of snow water equivalent from L-band radar interferometry: simulation and experiment, *Intern. J. Remote Sensing*, 2020, Vol. 41, No. 24, pp. 9328–9359, DOI: 10.1080/01431161.2020.1798551.
8. Lebedeva M. A., Sankov V. A., Zakharov A. I., Zakharova L. N., Surface deformations near the Baikal-Amur railway from differential SAR interferometry data, *Geodynamics and Tectonophysics*, 2016, Vol. 7, No. 2, pp. 315–328, DOI: 10.5800/GT-2016-7-2-0209.