О возможности применения РСА-интерферометрии с использованием снимков со спутников Sentinel-1 при изучении оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи

Е. И. Смольянинова, Е. А. Киселева, П. Н. Дмитриев, В. О. Михайлов

*Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия
E-mail: katsmol@mail.ru*

В работе рассмотрены вопросы применения радарных снимков со спутников Sentinel-1 для изучения оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи методами радарной спутниковой интерферометрии (InSAR). Приведена карта оползневых участков по данным InSAR, построенная по результатам расчётов полей смещений с использованием снимков со спутников Sentinel-1A с восходящей и нисходящей орбит за период 2015–2016 гг., а также снимков с восходящей орбиты спутника ALOS PALSAR за период 2007–2010 гг. Эта карта была сопоставлена с картой оползневой опасности Краснополянского поселкового округа. Интерферометрическая обработка проводилась с применением методов DInSAR и PS-InSAR, реализованных в свободных программных пакетах SNAP и StaMPS/MTI, и метода SBAS, реализованного в пакете ENVI SARscape. Показано, что комплексирование различных методов обработки снимков Sentinel-1 позволяет выявлять активные, периодически активизирующиеся и временно стабильные оползневые склоны и изучать динамику их движений. Приведены графики временных серий для ряда активных оползней. На примере оползня в экстрим-парке «Роза Хутор» проанализирована динамика смещений поверхности на этом участке по данным InSAR; показано, что вырубка леса и возведение спортивных объектов привели здесь к активизации оползневых процессов в пределах древнего оползневого бассейна.

Ключевые слова: радары с синтезированной апертурой, спутниковая интерферометрия, InSAR, космический мониторинг, оползни, Sentinel-1, Большой Сочи, Красная поляна

Одобрена к печати: 30.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111

Введение

Район Большого Сочи и, в частности, его горный кластер (окрестности посёлка Красная поляна) всегда характеризовался высокой оползневой активностью вследствие горного рельефа и преобладания в геологическом разрезе слабосцементированных и водонасыщенных за счёт обильных осадков глинистых пород. В последние годы вследствие увеличения антропогенной нагрузки, вызванной дальнейшим расширением горноклиматических курортов в окрестности посёлка Красная поляна и превращением их в курорты международного класса, активность оползней — как древних, периодически активизирующихся, так и вновь образованных — возрастает. В связи с этим постоянное изучение активности оползневых склонов, в частности с применением спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА-интерферометрия или InSAR), становится всё более актуальным (Дмитриев и др., 2012; Kiseleva et al., 2014). Под изучением активности оползней в данном случае мы понимаем их обнаружение, мониторинг движений и оценку оползневого риска. Методы InSAR успешно используются для решения этих задач. Обзоры литературы по этой теме можно найти, например, в работах (Михайлов и др., 2014; Crosetto et al., 2016; Scaioni et al., 2014; Wasowski, Bovenga, 2014). Суть методов состоит в том, что в результате интерферометрической обработки пары DInSAR — Differential InSAR или серий снимков MTI InSAR — MultiTemporal InSAR строятся скорости смещений поверхности в направлении визирования спутника (V_{los}) в период между съёмками. Склоны, на которых фиксируются аномальные по величине значения V_{los} , как правило, являются активными оползневыми склонами. (Вопросы оценки трёх компонент вектора смещений

для оползневых склонов по данным о V_{los} рассмотрены в работе (Михайлов и др., 2012.) При использовании серий снимков построение графиков временных серий для этих склонов за период съёмки позволяет анализировать динамику скоростей их смещений, производить мониторинг и оценку оползневой опасности. Однако условия для применения РСА-интерферометрии в горном кластере Большого Сочи очень сложные: горный рельеф, густая растительность в весенне-осенний период и мощный снеговой покров зимой, сравнительно малое количество объектов на оползневых склонах, хорошо отражающих радарный сигнал, переменчивые погодные условия, создающие атмосферные помехи. На период до начала интенсивного освоения этой территории надёжные результаты для горного кластера были нами получены только с использованием снимков со спутника ALOS PALSAR (2007–2010), более низкочастотное (по сравнению с другими спутниками) излучение которого обладает хорошей проникающей способностью. В настоящее время регулярная съёмка этой территории ведётся с более высокочастотных, чем ALOS PALSAR (и, соответственно, менее эффективных для работы в залесенных районах), спутников Sentinel-1. Однако, учитывая, что снимки со спутников Sentinel-1 с интервалом в 6–12 дней можно бесплатно получить по сети Интернет уже через несколько часов после съёмки, применение этих снимков для изучения оползневой опасности в районе горного кластера Большого Сочи представляется весьма перспективным.

Использованные снимки и методы обработки

Вопросы применения InSAR для изучения оползневой активности склонов горного кластера Большого Сочи до и в процессе начала строительства Олимпийских объектов разрабатывались по имеющимся на тот период снимкам со спутников ALOS PALSAR за период 2007–2010 гг. (таблица) и ENVISAT за период 2003–2012 гг. Результаты, полученные по снимкам со спутника ENVISAT, были менее надёжны вследствие низкой когерентности этих снимков в условиях данного района. Для изучения оползневой активности после Олимпийских игр 2014 г. (2015–2017 гг.) мы использовали снимки, выполненные с восходящей и нисходящей орбит запущенного в 2014 г. спутника Sentinel-1. При интерферометрической обработке изображений нами были использованы как метод DInSAR, реализованный в свободном пакете SNAP, так и две модификации MTI InSAR: метод устойчивых отражателей PS-InSAR, реализованный в свободном пакете StaMPS/MTI (Hooper et al., 2004, 2007), и метод малых базовых линий SBAS (Berardino et al., 2002), реализованный в пакете ENVI SARscape. В таблице приведён перечень использованных снимков и методы InSAR, с помощью которых были получены наилучшие результаты.

Перечень использованных снимков и методы их обработки

ALOS PALSAR, трек 588A, восходящая орбита	Sentinel-1A, трек 43A, восходящая орбита	Sentinel-1A, трек 123D, нисходящая орбита	Sentinel-1A, трек 43A, восходящая орбита	Sentinel-1A, трек 145A, восходящая орбита
18 снимков 22.01.2007– 17.09.2010	29 снимков 06.04.2015– 09.10.2016; 29 снимков 24.04.2016– 28.10.2017	20 снимков 12.04.2015– 21.09.2016	15 снимков 06.04.2015– 03.10.2015	15 снимков 13.04.2015– 27.11.2015
PS-InSAR StaMPS/MTI	SBAS ENVI SARscape	SBAS ENVI SARscape	PS-InSAR StaMPS/MTI	DInSAR SNAP

Интерферометрическую обработку мы начинали с построения парных интерферограмм с минимальным временным интервалом между снимками — 12 дней. По построенным парным интерферограммам производился анализ когерентности и в соответствии с этим — отбор снимков для дальнейшей обработки методами MTI. На парных интерферограммах, соответ-

ствующих периодам интенсивного снеготаяния и выпадения осадков по данным метеостанции «Красная поляна», выделялись зоны локализованных смещений.

Вследствие невысокой когерентности снимков со спутника Sentinel-1 в условиях горного кластера Большого Сочи мы не использовали при расчётах по методу SBAS интерферограммы со значением временных базовых линий более 36 дней. Кроме того, из расчётов были исключены зимние снимки, когда, по данным метеостанции «Красная поляна», область исследований была покрыта снегом. Количество снимков по трекам 43A и 123D только за один весенне-осенний период (например, 2015 или 2016 г.) оказалось недостаточным для применения методов MTI InSAR. При расчётах были использованы по два набора снимков для каждого трека: 2015–2016 и 2016–2017 гг.

Результаты изучения оползневой активности склонов горного кластера Большого Сочи в 2015–2016 гг.

На *рис. 1* показаны оползневые участки по данным InSAR, нанесённые на карту оползневой опасности Краснополянского поселкового округа Муниципального образования города-курорта Сочи (Вожик, 2016). Белыми овалами с номерами отмечены оползневые участки, для которых ниже приведены графики временных серий смещений.

Рис. 1. Оползневые проявления по данным InSAR (метки), нанесённые на карту оползневой опасности Краснополянского поселкового округа Муниципального образования города-курорта Сочи (Вожик, 2016)

Рис. 2. Графики временных серий смещений в направлении на спутник для оползневых участков, отмеченных как N1–N4 на рис. 1 (для областей с максимальными значениями V_{los}), построенные по результатам расчётов по сериям снимков с треков 43A (восходящая орбита, красный цвет) и 123D (нисходящая орбита, синий цвет)

Рис. 3. Экстрим-парк «Роза Хутор»: а — снимки Google Earth до строительства объектов инфраструктуры (2010), б — после строительства (2014); в, г — средняя скорость смещения в направлении на спутник V_{los} по снимкам Sentinel-1A 2015–2016 гг. с восходящего (43A) и нисходящего (123D) треков соответственно. Обработка методом SBAS в пакете ENVI SARscape. Описание меток см. на рис. 1

На *рис. 2* (см. с. 106) представлены графики временных серий смещений для оползневых участков, отмеченных на *рис. 1* как N1–N4. Проекции смещений вниз по склону на направление визирования спутника различны для восходящей и нисходящей орбит, поэтому графики для этих двух случаев имеют разный вид.

На *рис. 3* (см. с. 106) приведены результаты подробного исследования оползня в экстрим-парке «Роза Хутор» (N1). Снимки Google Earth данного района, иллюстрирующие изменения этой территории в результате строительства объектов инфраструктуры, представлены на *рис. 3а, б*. На *рис. 3в, г* приведены скорости в направлении визирования спутника (V_{los}) с восходящего и нисходящего треков, рассчитанные по сериям снимков со спутника Sentinel-1A за 2015–2016 гг. (см. *таблицу*).

Обсуждение результатов

Анализ карт оползневых проявлений по данным InSAR за 2015–2016 гг. (см. *рис. 1*) позволил сделать следующие заключения.

В условиях горного кластера методы InSAR позволяют обнаружить большое количество новых медленных оползней, которые не были отмечены по наземным данным. Оползни, выделяемые по InSAR, можно подразделить на активные (выделяемые по снимкам с восходящего и нисходящего треков 2015–2016 гг. методами MTI SBAS — красные, синие и зелёные метки на *рис. 1*) и периодически активизирующиеся в периоды интенсивного снеготаяния и выпадения большого количества осадков (DInSAR, жёлтые метки на *рис. 1*). Почти все эти оползни находятся в районах проложенных горнолыжных трасс и вырубок под подъёмники (*рис. 4*). Оползни, отмеченные по наземным данным, для которых по данным InSAR фиксируются близкие к нулю смещения, можно отнести к временно стабильным (на период радарной съёмки).

Если оползни, отмеченные по наземным данным, расположены на залесенных склонах, то они могут быть не выявлены с помощью InSAR по снимкам с Sentinel-1. Это связано с низкой когерентностью этих снимков в условиях густой растительности.

Рис. 4. Оползневые участки по данным InSAR на карте Google Earth 2017 г.

Рис. 5. Температурная кривая за 2015–2016 гг. по данным метеостанции «Красная поляна»

Рис. 6. Результаты расчетов по серии снимков со спутника Sentinel-1A 2016–2017 гг., трек 43A, восходящая орбита (обработка методом SBAS в пакете ENVI SARscape) и фото оползневых проявлений для района экстрим-парка «Роза Хутор»: а — средние скорости смещений в направлении на спутник, V_{los} ; б — график временной серии смещений в направлении на спутник для участка с максимальными значениями V_{los} ; в — фото оползневых проявлений в западной окрестности экстрим-парка в феврале 2018 г.; г — то же для северной окрестности. Описание меток см. на рис. 1

Так, например, на правом берегу р. Мзымты большинство оползневых проявлений, зафиксированных наземными методами, по данным со спутника Sentinel-1 не обнаруживаются, и оценить их активность методами InSAR не удаётся. Применение программного пакета StaMPS/MTI, специально разработанного для районов с малым количеством хорошо отражающих радарный сигнал объектов, позволило получить некоторое количество устойчиво отражающих площадок на этих участках, но их количество недостаточно для идентификации оползней. В ряде случаев оползневые склоны на залесенных территориях фиксируются по снимкам со спутника ALOS (например, метки 17, 23, 24, 25 на *рис. 1*).

Оползневая активность в этом регионе непосредственно связана с обводненностью грунтов. Полученные методами InSAR результаты сравнивались с данными о выпавших осадках и температурными кривыми с метеостанции «Красная поляна» (*рис. 5*, см. с. 108). По графикам временных серий (см. *рис. 2б, в и г*) выделяется период активизации в апреле 2015 г., вызванный интенсивным снеготаянием мощного снежного покрова в периоды резкого потепления.

Подробное исследование оползня в районе экстрим-парка «Роза Хутор» (N1) (см. *рис. 1–3*) позволило установить, что скорости смещений на этом участке в 2016 г. были несколько ниже, чем в 2015 г. Это связано с меньшим количеством выпавшего снега и более равномерным его таянием в 2016 г. по сравнению с 2015 г. Однако в целом оползневой процесс в этом районе продолжает интенсивно развиваться. Это хорошо видно по *рис. 3в и 6а* (см. с. 108), где представлены скорости V_{los} для периодов 2015–2016 и 2016–2017 гг. соответственно, временным сериям (*рис. 2а и 6б*) и фотографиям оползневых проявлений в окрестности экстрим-парка зимой 2017–2018 гг. (*рис. 6в, г*).

Спортивные сооружения экстрим-парка «Роза Хутор» размещены в пределах древнего оползневого бассейна (Пуляева и др., 2013). По результатам наземных исследований, согласно карте (Вожик, 2016), на этом участке оползневых проявлений не отмечалось. Небольшие по площади (до 100 м) оползневые проявления откартированы только в нижнем борту автомобильной дороги ниже экстрим-парка — под зелёной меткой N1 (*рис. 3 и 6*). Наличие медленных смещений (до 15 мм/год в направлении на спутник) на месте самого экстрим-парка все же фиксировалось по снимкам ALOS PALSAR (2007–2010) ещё до вырубки лесного массива (белая метка N29 на *рис. 1 и 3*). Несмотря на предпринимаемые меры по удержанию склонов, вырубка леса и строительство здесь Олимпийских объектов (*рис. 3а и 6*) привели к нарастающей, как показано выше, активизации оползневых процессов.

Выводы

Спутниковая интерферометрия (InSAR) с использованием радарных снимков со спутников Sentinel-1 может успешно использоваться для изучения оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи. Комплексирование различных методов InSAR позволяет выявлять активные, периодически активизирующиеся и временно стабильные оползневые склоны, уточнять и обновлять карты оползневых проявлений и оползневой опасности. Применение InSAR с привлечением радарных снимков со спутника Sentinel-1 для мониторинга оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи с его постоянно растущей антропогенной нагрузкой представляется весьма перспективным ввиду малых затрат и возможности уменьшения объёмов дорогостоящих наземных исследований.

Работа выполнена в рамках Госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Вожик А.А. Оценка экзогенной геологической опасности при ведении государственного мониторинга состояния недр // 8-й Всерос. съезд геологов 26–28 октября 2016 г.: Презентационные материалы круглого стола «Государственный мониторинг состояния недр и региональные

- гидрогеологические работы». Москва, 2016. 71 с. URL: http://www.specgeo.ru/pdf/doklad_viii_geolog_04.pdf.
2. *Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И.* Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
 3. *Михайлов В. О., Киселева Е. А., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П.* Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // *Геофизические исследования*. 2012. № 3. С. 5–17.
 4. *Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Дорохин К. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А.* Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 120–130. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
 5. *Пуляева И. А., Орехова Г. В., Пуляев Н. И.* Мониторинг оползневых процессов на территории размещения олимпийских объектов горного кластера // *Инженерные изыскания*. 2013. № 10–11. С. 82–87.
 6. *Crosetto M., Monserra 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.
 7. *Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B.* A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Lett.* 2004. V. 31. P. 1–5.
 8. *Hooper A., Segall P., Zebker H.* Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos // *J. Geophysical Research*. 2007. V. 112. P. B07407. DOI: 10.1029/2006JB004763.
 9. *Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E., Dmitriev P., Golubev V., Timoshkina E., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R.* PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus // *Elsevier, Proceeding Technology*. 2014. V. 16. P. 404–413.
 10. *Scaioni M., Longoni L., Melillo V., Papini M.* Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives // *Remote Sensing*. 2014. V. 6. P. 9600–9652.
 11. *Wasowski J., Bovenga F.* Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi-Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives // *Engineering Geology*. 2014. V. 174. P. 103–138.

On the possibility of using Sentinel-1 SAR interferometry to study landslide activity in the mountain cluster of the Big Sochi area

E. I. Smolianinova, E. A. Kiseleva, P. N. Dmitriev, V. O. Mikhailov

*Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia
E-mail: katsmol@mail.ru*

In the present paper using of Sentinel-1 radar images to investigate landslide activity in the mountain cluster of the Big Sochi area with the help of satellite radar interferometry methods (InSAR) is discussed. We present the InSAR landslide inventory map based on Sentinel-1 acquisitions from ascending and descending orbits for the time period 2015–2016 as well as ALOS PALSAR acquisitions from ascending orbit for 2007–2010. The InSAR landslide inventory was put together with the landslide risk assessment map of the Krasnaya Polyana region derived from ground and satellite optical data. For interferometric processing, we used DInSAR and PS-InSAR techniques within the free SNAP and StaMPS/MTI software as well as SBAS technique within ENVI SARscape. It was found that integration of results of different methods of InSAR processing makes it possible to recognize active, temporary active and dormant landslides as well as to investigate dynamics of their movements. Time series of displacements for several active landslides detected from both ascending and descending tracks are presented. The analysis of the InSAR time series of displacements for the case of the landslide in the extreme park Rosa Khutor showed that deforestation and construction of sports facilities had triggered landslide activity in the ancient landslide basin.

Keywords: synthetic aperture radar, satellite interferometry, InSAR, space monitoring, landslide, Sentinel-1, Big Sochi, Krasnaya Polyana

Accepted: 30.07.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111

References

1. Vozhik A.A., Otsenka ekzogennoi geologicheskoi opasnosti pri vedenii gosudarstvennogo monitoringa sostoyaniya nedr (Risk assessment of exogenetic geological processes in the course of state monitoring of the state of the subsurface), *VIII Vserossiiskii s"ezd geologov 26–28 oktyabrya 2016 g. Prezentatsionnye materialy kruglogo stola "Gosudarstvennyi monitoring sostoyaniya nedr i regional'nye gidrogeologicheskie raboty"* (VIII All-Russia Congress of Geologists 26–28 October 2016. Presentations of the round table meeting "State monitoring of the state of the subsurface and regional hydrogeological projects"), Moscow, 2016, 71 p., URL: http://www.specgeo.ru/pdf/doklad_viii_geolog_04.pdf.
2. Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., Kiseleva E.A., Mikhailov V.O., Smol'yaninova E.I., Nekotorye problemy obrabotki i interpretatsii dannykh sputnikovoi radarnoi interferometrii na primere monitoringa opolznevnykh protsessov (On processing and interpretation of the SAR interferometry data in the case of the landslide monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 130–142.
3. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Otsenka polnogo vektora smeshchenii zemnoi poverkhnosti i tekhnogennykh ob"ektov po dannym radarnoi sputnikovoi interferometrii dlya oblastei razrabotki mestorozhdenii nefi i gaza (Estimation of full vector of displacements of the earth's surface and technogenic objects based on InSAR data applied to oil and gas production areas), *Geofizicheskie issledovaniya*, 2012, No. 3, pp. 5–17.
4. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., Dorokhin K.A., Timoshkina E.P., Khairtdinov S.A., Some problems of landslide monitoring using satellite radar imagery with different wavelengths: Case study of two landslides in the region of Greater Sochi, *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 576–587.
5. Pulyaeva I.A., Orekhova G.V., Pulyaev N.I., Monitoring opolznevnykh protsessov na territorii razmeshcheniya olimpiiskikh ob"ektov gornogo klastera (Monitoring of landslide processes in the territory of the Olympic objects of the mountain cluster), *Inzhenernye izyskaniya*, 2013, No. 10–11, pp. 82–87.
6. Crosetto M., Monserra O., Cuevas-González M., Devanthery N., Crippa B., Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 115, pp. 78–89.
7. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers, *Geophysical Research Lett.*, 2004, Vol. 31, pp. 1–5.
8. Hooper A., Segall P., Zebker H., Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, p. B07407.
9. Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E., Dmitriev P., Golubev V., Timoshkina E., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R., PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus, *Elsevier, Proceeding Technology*, 2014, Vol. 16, pp. 404–413.
10. Scaioni M., Longoni L., Melillo V., Papini M., Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives, *Remote Sens.*, 2014, Vol. 6, pp. 9600–9652.
11. Wasovski J., Bovenga F., Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi-Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives, *Engineering Geology*, 2014, Vol. 174, pp. 103–138.