

Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи

Е. И. Смольянинова, Е. А. Киселева, В. О. Михайлов

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

В работе рассмотрены вопросы применения методов радарной спутниковой интерферометрии к снимкам со спутников Sentinel-1 (S-1) для изучения деформаций земной поверхности, в частности в результате оползневых процессов, в районе прибрежного кластера Большого Сочи. Построена карта областей активных деформаций для участка Сочи – Адлер по 350 радарным снимкам со спутников S-1A и S-1B с восходящих и нисходящих орбит за три года (2015–2018). Интерферометрическая обработка снимков производилась с привлечением технологий SBAS ENVI SARscape и PS StaMPS/MTI. Предлагаемая методология интерпретации результатов интерферометрической обработки снимков S-1 позволяет в условиях плотной индивидуальной застройки исследуемого района уточнять геометрию оползневых структур, откартированных наземной съёмкой, выделять новые оползневые структуры и участки активизации. Приведены фрагменты уточнённых карт. Сопоставление с картой оползневых проявлений по наземным данным (Вожик, 2016) показало, что наземные и спутниковые данные дополняют друг друга и их целесообразно комплексировать при мониторинге оползневой активности районов с природными ландшафтами и техногенной застройкой. По графикам временных серий для ряда активных оползней установлено, что активизация оползней в исследуемой области в основном происходит в период с ноября по июнь, однако часть оползневых структур движется непрерывно со скоростями до 80 мм/год.

Ключевые слова: радары с синтезированной апертурой, спутниковая РСА-интерферометрия, космический мониторинг, оползни, просадки грунта, Sentinel-1A/B, Большой Сочи

Одобрена к печати: 24.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155

Введение

Методы РСА-интерферометрии (РСА — радары с синтезированной апертурой) широко используются при изучении смещений на оползневых склонах, проседаний грунтов над шахтами и тоннелями, смещений земной поверхности в результате землетрясений и других природных и техногенных процессов (см. обзорные работы (Михайлов и др., 2012; 2014, Crosetto et al., 2016; Scaioni et al., 2014; Wasowski, Bovenga, 2014)). По двум интерферометрическим снимкам определяют смещения земной поверхности в направлении визирования спутника (V_{los}) (LOS — line of site) за период между съёмками. При использовании серий снимков можно получить временные ряды смещений за весь период съёмки, что позволяет анализировать изменения скоростей смещений и производить мониторинг развития опасных процессов, в том числе оползневых проявлений, широко распространённых в районе Большого Сочи. Постоянно растущая здесь антропогенная нагрузка обуславливает актуальность совершенствования систем мониторинга таких процессов, в частности с использованием спутниковых методов.

С 2011 г. в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук проводятся исследования в области применения спутниковой РСА-интерферометрии для изучения оползневой активности в районе Черноморского побережья Кавказа с использованием снимков в разных частотных диапазонах (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2012, 2014; Kiseleva et al., 2014). В настоящее время особый интерес представляют изображения со спутников Sentinel-1A/B (S-1A/B). Спутники производят повторную съёмку одной и той же территории с интервалом в 6 дней, и их снимки можно получить в интернете уже через несколько часов после съёмки. Для оперативного анализа такого потока информации необходимы

специальные методы, направленные на автоматизацию процесса обработки и интерпретации. Проблемные вопросы методологии использования снимков со спутников S-1A/B для изучения активных деформаций, в частности оползней, обсуждаются, например, в работах (Barra et al., 2017; Solari et al., 2017).

В данной статье приводятся первые результаты применения трёхлетних серий снимков со спутников S-1A/B и предлагается методология выявления и мониторинга областей активных деформаций (ОАД) поверхности в прибрежном кластере Большого Сочи.

Район исследований, исходные данные и технологии обработки

Район исследований находится в наиболее густонаселённой полосе береговой линии Большого Сочи шириной около 5 км и протяжённостью около 50 км от пос. Лоо до Адлера (рис. 1). Эта территория, как и всё Черноморское побережье Кавказа, отличается высокой оползневой активностью, поскольку горные склоны здесь сложены пластичными водонасыщенными породами. Оползневые структуры, как правило, представлены (по классификации (Студен, Varnes, 1996)) крайне медленно (до 16 мм/год) и очень медленно (до 1,6 м/год) движущимися небольшими оползневыми телами с размерами на поверхности до первых десятков метров. Такие медленные смещения хорошо фиксируются методами РСА-интерферометрии. В целом этот район благоприятен для применения спутниковой интерферометрии в силу наличия большого количества объектов, хорошо отражающих радарный сигнал, относительно небольших искажений, обусловленных топографией (пологий рельеф до 300–400 м над уровнем моря) и отсутствием снежного покрова в зимний период, что позволяет использовать круглогодичную съёмку.



Рис. 1. Район исследований (красный контур). Белый контур — участок, для которого далее приводятся фрагменты карт

Съёмка района Большого Сочи ведётся с четырёх треков со спутников S-1A (с 2015 г.) и S-1B (с конца 2016 г.), с восходящей (треки 43A и 145A) и нисходящей (треки 123D и 21D)

орбит. Это создаёт благоприятные условия для проведения так называемой кросс-валидации, т.е. получения надёжных оценок смещений за счёт сравнения результатов визирования поверхности под разными углами. Снимки, использованные при расчётах, перечислены в *табл. 1*.

Таблица 1. Снимки, использованные при расчётах

Спутник	Номер трека	Орбита	Количество снимков	Интервал съёмки
S-1A	43A	Восходящая	101	06.04.2015–22.12.2018
	145A		88	25.04.2015–15.05.2018
	123D		70	06.05.2015–02.05.2018
S-1B	43A		59	07.01.2017–28.12.2018

Интерферометрическая обработка снимков со спутника S-1A и расчёты полей смещений проводились по методу малых базовых линий SBAS (Berardino et al., 2002), реализованном в пакете ENVI SARscape v.5.3.1. Фильтрация интерферограмм перед развёрткой фазы осуществлялась фильтром Гольдштейна (минимальные и максимальные значения коэффициентов соответственно 0,3 и 2,5), развёртка фазы — методом Delaunay MCF. При вычитании топографической фазы использовалась цифровая модель рельефа SRTM v.4, а при геокодировании результатов — ASTER GDEM. Численные эксперименты, проведённые с использованием серий снимков, относящихся к различным периодам времени, показали, что для данного района наилучшие результаты получаются для двухгодичных серий, в частности для снимков, выполненных с октября 2017 г. по декабрь 2018 г. Это связано с тем, что для этого периода доля снимков в серии, обладающих наиболее высокой когерентностью, максимальна, чему способствует незначительный вегетационный покров в интервале поздняя осень — ранняя весна и отсутствие снега.

Поскольку версия 5.3.1 программного пакета ENVI SARscape не позволяет работать со снимками спутника S-1B, для расчётов полей смещений по сериям снимков с обоих спутников S-1A и S-1B (2017–2018) нами был использован свободный пакет PS StaMPS/MTI 4.1b1 (Hooper, 2004, 2007). Интерферограммы для PS StaMPS/MTI были подготовлены в свободном пакете SNAP 6.0. Алгоритмы обработки снимков в методах SBAS ENVI SARscape и PS StaMPS/MTI существенно различаются, поэтому сравнение результатов, полученных обоими методами, позволяет повысить надёжность кросс-валидации.

Построение карт и анализ результатов производились в открытом программном пакете QGIS 3.2.2.

Результаты изучения областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи

Основным результатом интерферометрической обработки снимков являются поля смещений земной поверхности или техногенных объектов в направлении визирования спутника. На картах, построенных для всего района исследований (красный контур на *рис. 1*), отдельные оползневые структуры в силу их малых размеров различимы только при большом увеличении, поэтому в данной работе показаны увеличенные фрагменты карт для участка, отмеченного белым контуром на *рис. 1*. На *рис. 2* (см. с. 150) приведены фрагменты карт средних скоростей смещений в направлении визирования спутника, построенные на основе описанных выше расчётов, с которых удалены пиксели, имеющие точность определения значений высот ниже 3 м, а скоростей — больше 4 мм/год. Точность определения значений высот и скоростей оценивалась на базе анализа пространственной когерентности в пакете ENVI SARSCAPE.

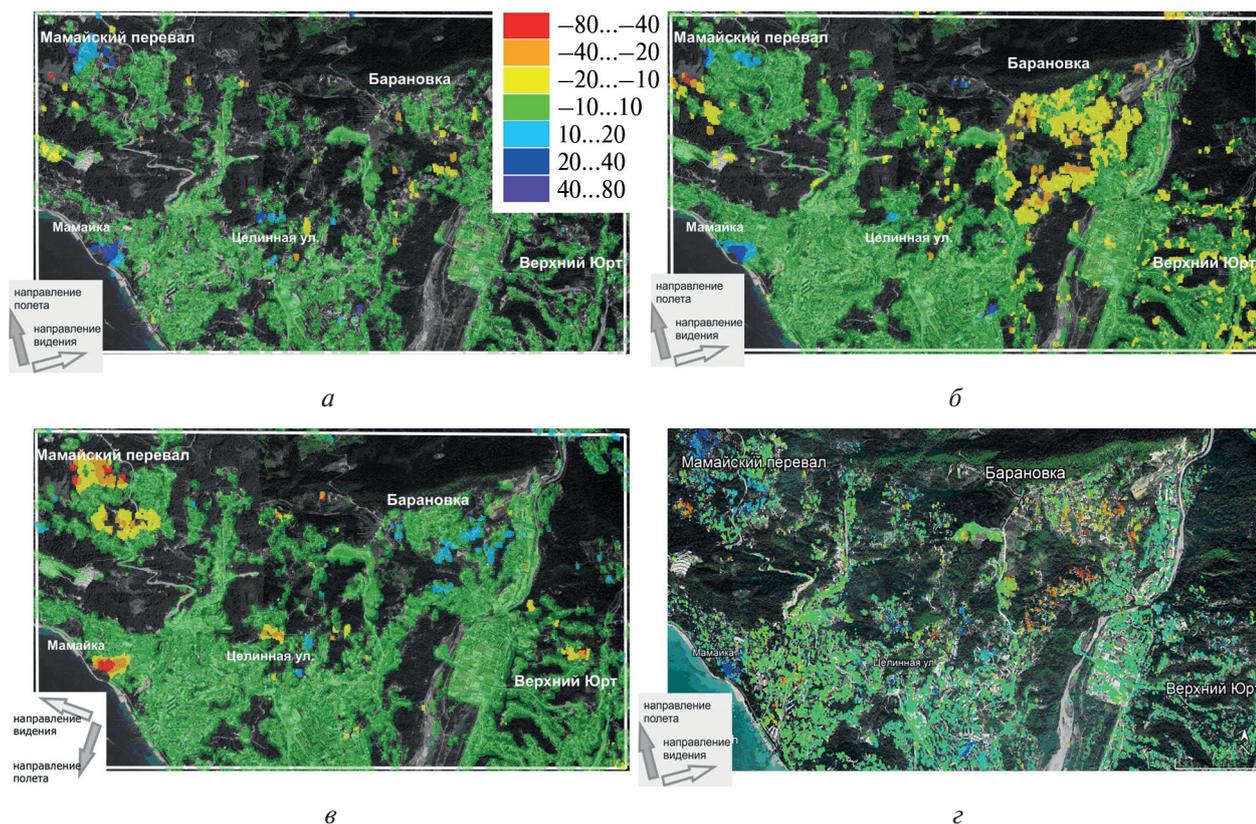


Рис. 2. Фрагменты карт средних скоростей смещений V_{los} (в направлении визирования спутника) на карте Google по снимкам со спутника S-1A за период 2015–2018 гг.: а — трек 43А; б — 145А; в — 123D; г — то же по снимкам со спутников S-1А и S-1В (70 снимков) за период 2017–2018 гг., трек 43А. Скорость V_{los} положительна, если она направлена к спутнику, поэтому знаки смещений для восходящих и нисходящих треков могут различаться. Шкала скоростей (в мм/год) представлена на рис. 2а. Положение фрагментов показано на рис. 1 белым контуром

Интерпретация результатов

На первом этапе из массивов средних скоростей смещений поверхности (фрагменты представлены на рис. 2) выделялись группы соседних пикселей, для которых значения скоростей смещений превышают заданный порог. Эти группы считаются областями активных деформаций (ОАД). В данном случае для каждого трека мы выделили области со скоростями в направлении LOS $V_{los} > 15$ мм/год. Смещения со скоростями порядка 10–100 мм/год, согласно (Mansour et al., 2011), не приводят к значительным разрушениям, но фиксируются визуально в виде трещин в конструкциях, дорожном полотне и т.д. В данном случае выбранное пороговое значение 15 мм/год позволяет оконтурить максимальное число ОАД. Результаты по всем трём трекам были нанесены на карты Google.

После этого путём совместного анализа вычисленных полей смещений, карт рельефа, экспозиции склонов и их крутизны, а также с учётом геометрии полёта спутника выявляются возможные причины образования ОАД. В исследуемом районе практически все ОАД расположены на склонах и, вероятнее всего, обусловлены оползневыми процессами. Исключением являются ОАД в Имеретинской низменности, где смещения, предположительно, связаны с уплотнением насыпных грунтов и изменением гидрологического режима вследствие строительства здесь олимпийских объектов.

Поскольку одни и те же участки при съёмке с разных орбит визируются под разными углами, ОАД на склонах (оползни) почти всегда отображаются неодинаково на картах смещений с разных треков (см. рис. 2, 3), поэтому использование наборов снимков с разных треков позволяет более точно определять границы активных оползневых участков.

Следующим этапом интерпретации является сопоставление полученных карт ОАД с наземными данными, в нашем случае — с картой оползневых проявлений (Вожик, 2016), на которой нанесены области проявления оползневых процессов (ООП) по результатам наземных наблюдений. На *рис. 3* показан результат наложения этих карт для представленных на *рис. 2* фрагментов.

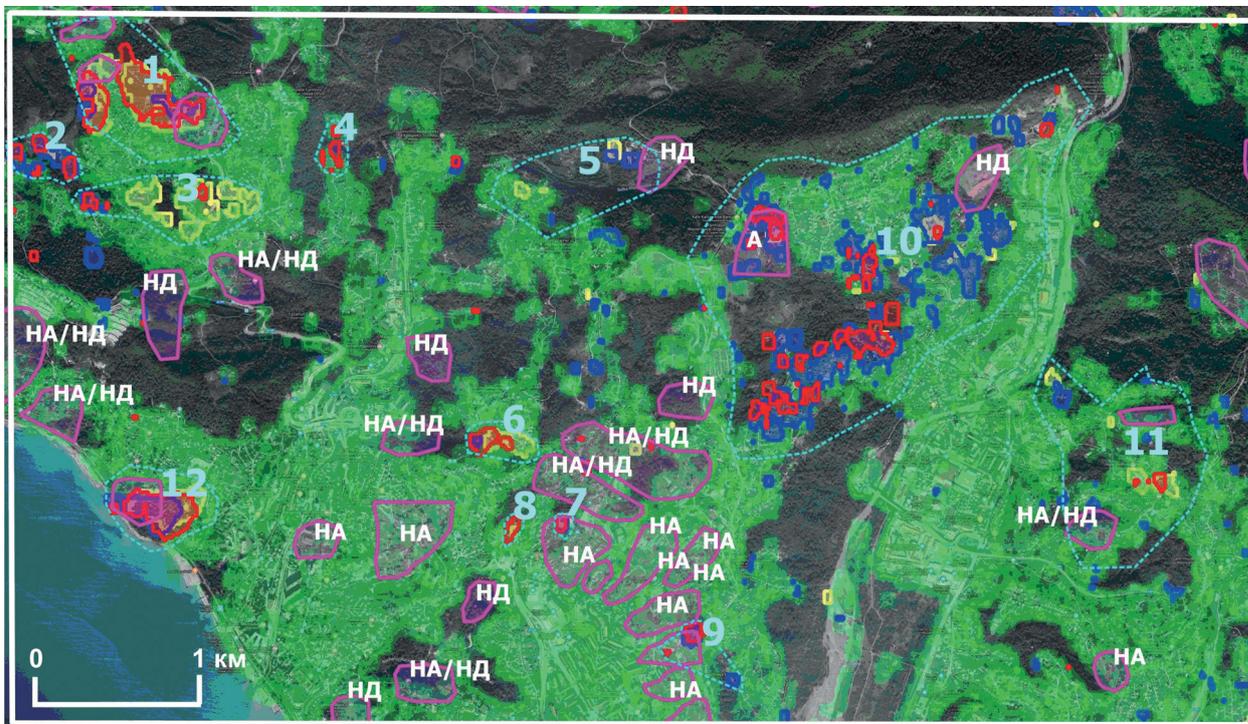


Рис. 3. Фрагмент карты областей активных деформаций, полученных с использованием РСА-интерферометрии, и проявлений оползневых процессов по наземным данным (ООП по работе (Вожик, 2016)). Положение фрагмента показано белым контуром на *рис. 1*, его размер — 7500×4300 м. Соответствующие карты средних скоростей смещений V_{los} представлены на *рис. 2*. Красным цветом оконтурены ОАД по данным с трека 43А, синим — 145А, жёлтым — 123D; зелёным цветом показаны области с близкими к нулю смещениями земной поверхности ($V_{los} < 15$ мм/год). ООП отмечены розовыми контурами. Остальные обозначения описаны в тексте и *табл. 2*

В условиях прибрежной части Большого Сочи РСА-интерферометрия позволяет уверенно выделять все крупные оползневые районы. Однако границы небольших по площади ОАД по данным РСА-интерферометрии и наземным данным совпадают не всегда. Это связано с тем, что в районах с индивидуальной застройкой наземными методами зафиксировать смещения со скоростями до нескольких сантиметров в год часто бывает затруднительно, поэтому такими методами выявляются в основном оползни на незастроенных склонах. По спутниковой интерферометрии картина обратная: участки с плотной индивидуальной застройкой обладают существенно лучшей когерентностью на снимках, чем покрытые растительностью участки без зданий и сооружений, поэтому оценить смещения по снимкам S-1A/B на застроенной территории гораздо легче, чем на незастроенной. Этим определяется целесообразность совместного использования РСА-интерферометрии и наземных методов в системах мониторинга.

В районах с густой застройкой спутниковые данные позволили не только выявить новые активные оползневые участки, которые не были откартированы по наземным данным, но также откорректировать границы ООП (см. *рис. 3* и *табл. 2*). В ряде случаев РСА-интерферометрия также позволяет сделать заключение об активности оползней, выделенных ранее по наземным данным: А — активные (если ООП совпадают с ОАД), НА — неактивные (если

скорости V_{los} меньше 15 мм/год — зелёные области на *рис. 3*). ООП, на которых не удалось идентифицировать отражатели радарного сигнала, имеют маркировку НД — нет данных.

Таблица 2. Характеристика ОАД и индексы надёжности идентификации для *рис. 2* и *3*

Местоположение	Характеристика ОАД	Индекс надёжности
Мамайский перевал	Откорректированные по результатам РСА-интерферометрии	5
ул. Туманяна	Новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии	3
ул. Прозрачная	Новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии	2
ул. Зенитная	Новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии	2
Русская Мамайка	Откорректированные по результатам РСА-интерферометрии	3
ул. Целинная	Новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии	4
ул. Восточная	Откорректированные по результатам РСА-интерферометрии	5
ул. Восточная	Новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии	3
ул. Высокогорная	Откорректированные по результатам РСА-интерферометрии	4
с. Барановка	Частично новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии, частично откорректированные	5
с. Верхний Юрт	Частично новые, выявленные по результатам РСА-интерферометрии, частично откорректированные	4
пос. Мамайка	Откорректированные по результатам РСА-интерферометрии	5

Важным этапом интерпретации является оценка надёжности выявления ОАД. Для этого мы использовали так называемый индекс надёжности, который определяется как число независимых результатов, по которым идентифицирована данная ОАД. Идентификация каждым из методов или по каждому из треков оценивается в единицу. Самое высокое значение индекса надёжности в нашем случае равно пяти, когда ОАД определена по данным со всех трёх треков спутника S-1A методом SBAS ENVI SARscape, а также с трека 43A спутников S-1A/B методом PS MTI/StaMPS и по наземным данным. Значения индексов надёжности для ОАД, показанных на *рис. 2* и *3*, представлены в *табл. 2*.

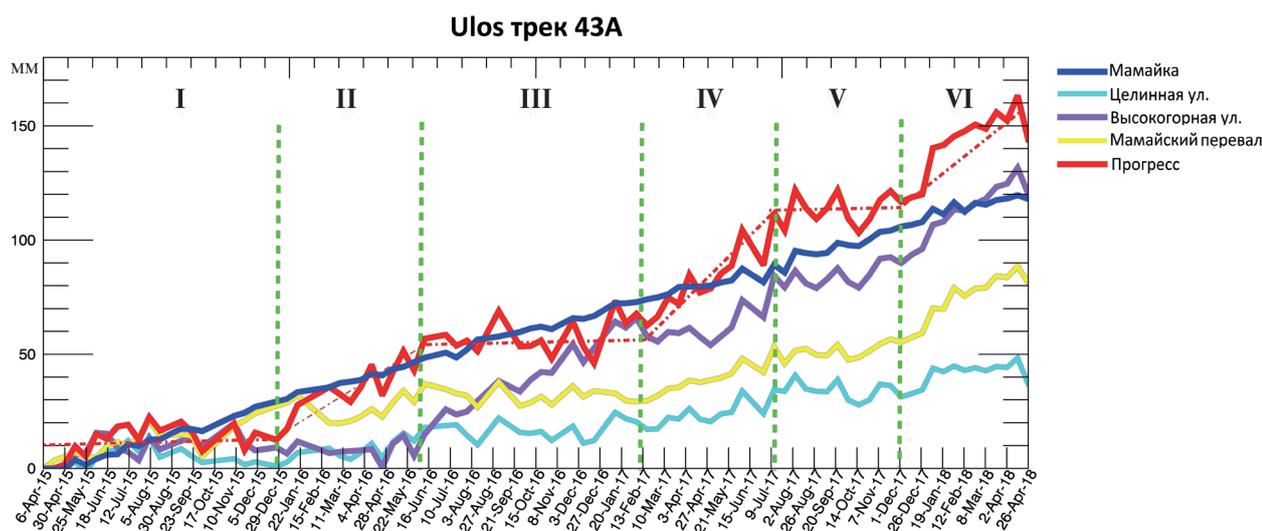


Рис. 4. Графики временных серий смещений для ряда оползней по данным S-1A, трек 43A. Местоположение и характеристика соответствующих ОАД представлены на *рис. 3* и в *табл. 2*. ОАД в пос. Прогресс находится за пределами фрагмента, показанного на *рис. 3*.

Следующим этапом интерпретации является изучение динамики ОАД за период съёмки. Построение временных серий смещений (пример для трека 43А приведён на *рис. 4*, см. с. 152) позволяет анализировать изменения активности ОАД, в частности выделять периоды активизации оползней (например, в пос. Прогресс это периоды II, IV, VI) и периоды стабильности (I, III, V). Для большинства оползней в районе исследований периоды активизации приходится на интервал с ноября по июнь. Однако некоторые оползни находятся в постоянном движении. Так, оползень в п. Мамайка движется практически непрерывно с максимальной средней скоростью V_{los} в центральной части до 60 мм/год (трек 43А).

Выводы

Полученные результаты показывают, что карты активных деформаций, построенные по спутниковым интерферометрическим данным, могут успешно использоваться для уточнения существующих карт оползневых проявлений в районе Большого Сочи и, следовательно, способствовать повышению эффективности существующих систем мониторинга. Данные спутников S-1A/B позволяют определять геометрию оползней, их активность, выявлять новые оползневые участки или места активизации. В частности, в пределах исследуемой области существенные дополнения к картам оползневых проявлений по наземным данным (Вожик, 2016) внесены в окрестности населённых пунктов Уч-Дере, Мамайка, Барановка, Верхний Юрт, Богушевка, Прогресс, Краевско-Армянское, Бестужевское, Молдовка, Высокое, Черешня. Здесь было обнаружено большое количество новых активных оползневых участков и откорректированы границы ранее отмеченных по наземным данным.

Временные серии смещений отдельных устойчиво отражающих объектов позволяют оценивать динамику смещений оползневых масс во времени. Так, было установлено, что движение значительного количества оползневых структур происходит ступенчато с периодами активизации в интервале с ноября по июнь.

Литература

1. *Вожик А. А.* Оценка экзогенной геологической опасности при ведении государственного мониторинга состояния недр // 8-й Всероссийский 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 // Изв. РАН. Сер. «Физика Земли». 2014. № 4. С. 120–130. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
5. *Barra A., Solari L., Bejar-Pizarro M., Monserrat O., Bianchini S., Herrera G., Crosetto M., Sarro R., Gonzalez-Alonso E., Mateos R. M., Ligüerzana S., López C., Moretti S.* A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images // Remote Sensing. 2017. V. 9(10). P. 1002. DOI: 10.3390/rs9101002.
6. *Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthery 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. Cruden D. M., Varnes D. J. Landslide Types and Processes // Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board. Special Report 247. National Research Council / eds. Turner A. K., Schuster R. L. Washington D. C.: National Academy Press, 1996. P. 36–75.
8. 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 Letters. 2004. V. 31. P. 1–5. DOI: 10.1029/2004GL021737.
9. 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.
10. 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 // Procedia Technology. 2014. V. 16. P. 404–413. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
11. Mansour M. F., Morgenstern N. R., Martin C. D. Expected damage from displacement of slow-moving slides // Landslides. 2011. V. 8. P. 117–131. DOI: 10.1007/s10346-010-0227-7.
12. 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. DOI: 10.3390/rs6109600.
13. Solari L., Barra A., Herrera G., Bianchini S., Monserrat O., Béjar-Pizarro M., Crosetto M., Sarro R., Morett S. Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data // Geomatics Natural Hazard and Risk. 2018. V. 9. P. 152–174. DOI: 10.1080/19475705.2017.1413013.
14. 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. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003.

Sentinel-1 InSAR for investigation of active deformation areas: case study of the coastal region of the Big Sochi

E. I. Smolianinova, E. A. Kiseleva, V. O. Mikhailov

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

The paper discusses some aspects of Sentinel-1 (S-1) InSAR application to investigate active surface deformations, in particular landslides, in the coastal cluster of the Big Sochi. We created a map of active deformation areas (ADA) for the Sochi-Adler region based on 350 S-1A, and S-1B acquisitions from ascending and descending orbits for the 2015–2018 time period. For image processing we incorporated SBAS ENVI SARscape and PS StaMPS/MTI technologies. In case of the densely built-up territories of the study area the suggested methodology of interpretation of the S-1 InSAR results allowed us to update boundaries of landslides being previously revealed by ground survey as well as fix new landslides and areas of activation. Fragments of the updated map were presented. Comparing the ADA map to the map of landslide phenomena in accordance with ground survey (Vozhik, 2016) we showed that ground based and remote sensing data complemented each other and it appeared efficient to combine them when monitoring landslides in regions including both rural and built-up areas. Using time series of displacements for a number of active landslides we found out that activation of landslides in the study area usually takes place between November and June, however, some landslides move permanently at a rate up to 80 mm/year.

Keywords: SAR, InSAR, satellite monitoring, landslides, ground subsidence, Sentinel-1, Big Sochi

Accepted: 24.07.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155

References

1. Vozhik A. A., Otsenka ekzogennoi geologicheskoi opasnosti pri vedenii gosudarstvennogo monitoinga 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"* (8th 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., available at: 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 opolznevykh protsessov (On processing and interpretation of the SAR interferometry data in the case of the landslide monitoring), *Sovremennyye 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 nefii 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, DOI: 10.1134/S1069351314040107.
5. Barra A., Solari L., Bejar-Pizarro M., Monserrat O., Bianchini S., Herrera G., Crosetto M., Sarro R., Gonzalez-Alonso E., Mateos R. M., Ligüerzana S., López C., Moretti S., A Methodology to Detect and Update Active Deformation Areas Based on Sentinel-1 SAR Images, *Remote Sensing*, 2017, Vol. 9(10), pp. 1002, DOI: 10.3390/rs9101002.
6. Crosetto M., Monserrat 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, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
7. Cruden D. M., Varnes D. J., Landslide Types and Processes, In: *Landslides, Investigation and Mitigation, Special Report 247*, Transportation Research Board, National Research Council, A. K. Turner, R. L. Schuster (eds.), Washington, DC: National Academy Press, 1996, pp. 36–75.
8. 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 Letters*, 2004, Vol. 31, pp. 1–5, DOI: 10.1029/2004GL021737.
9. 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, Vol. 112, p. B07407, DOI: 10.1029/2006JB004763.
10. 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, *Procedia Technology*, 2014, Vol. 16, pp. 404–413, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
11. Mansour M. F., Morgenstern N. R., Martin C. D., Expected damage from displacement of slow-moving slides, *Landslides*, 2011, Vol. 8, pp. 117–131, DOI: 10.1007/s10346-010-0227-7.
12. Scaioni M., Longoni L., Melillo V., Papini M., Remote Sensing for Landslide Investigations: An Overview of Recent Achievements and Perspectives, *Remote Sensing*, 2014, Vol. 6, pp. 9600–9652, DOI: 10.3390/rs6109600.
13. Solari L., Barra A., Herrera G., Bianchini S., Monserrat O., Béjar-Pizarro M., Crosetto M., Sarro R., Moretti S., Fast detection of ground motions on vulnerable elements using Sentinel-1 InSAR data, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2018, Vol. 9, pp. 152–174, DOI: 10.1080/19475705.2017.1413013.
14. Wasowski 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, DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.03.003.