

Выявление и мониторинг областей активных деформаций в Адлерском районе Большого Сочи путём анализа серий разночастотных спутниковых радарных снимков за 2007–2020 гг.

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

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

В работе приведены результаты оценки смещений земной поверхности и сооружений на территории Адлерского р-на Большого Сочи методами радарной спутниковой интерферометрии. Используются разночастотные радарные снимки с восходящих и нисходящих орбит, покрывающие тринадцатилетний период времени с 2007 по 2020 г., в том числе снимки спутников ALOS-1 (18 снимков за период 2007–2010 гг.), Envisat (12 снимков, 2011–2012 гг.), Sentinel-1A (около 300 снимков, 2015–2019 гг.). Обработка снимков производилась с использованием технологии SBAS в пакете ENVI SARscape. Построены карты деформаций поверхности по каждому набору данных. Выявлены современные области активных деформаций (ОАД), обусловленные оползневыми процессами на склонах и просадками грунтов. Идентифицировано более 20 активных оползневых участков, которые не были зафиксированы наземными методами, и 7 зон проседания в Имеретинской низменности. Построены временные серии смещений ОАД за период 2007–2020 гг. и проведено их сравнение с выпадением осадков по архивным данным. Установлено, что для оползневых процессов характерна периодичность максимумов и минимумов средних скоростей деформаций. Времена пиковых значений на разных участках совпадают в пределах 1–2 мес. Максимумы скоростей смещений приходятся на февраль–апрель, а минимумы — на август–октябрь. Непосредственной связи проседания в Имеретинской низменности с количеством выпадающих осадков не обнаружено. Кривые проседания показывают общие тенденции смещений поверхности и характеризуют эффективность систем дренажа и мероприятий по укреплению грунтов для выявленных ОАД. Максимальные величины просадок выявлены в районе ул. Журналистов, они достигают 300 мм за период 2015–2020 гг. Полученные карты деформаций поверхности хорошо согласуются с наземными данными. Метод спутниковой радарной интерферометрии не требует больших финансовых затрат и в густонаселённом Адлерском р-не, где фиксация малых деформаций поверхности во многих случаях затруднительна, позволяет существенно дополнить результаты наземных исследований. Полученные для Адлерского р-на результаты демонстрируют перспективность использования данного метода и в других районах Черноморского побережья.

Ключевые слова: радары с синтезированной апертурой, спутниковая интерферометрия, космический мониторинг, оползни, просадки грунта, Sentinel-1, ALOS-1, Envisat, Адлерский район, Имеретинская низменность, Большой Сочи

Одобрена к печати: 01.07.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65

Введение

В мировой практике РСА-интерферометрия (радар с синтезированной апертурой, *англ.* Interferometric synthetic aperture radar — InSAR) широко используется для решения широкого круга задач, связанных с деформациями земной поверхности (см. обзорные работы (Carla et al., 2019; Crosetto et al., 2016; Solari et al., 2018, 2020; Tomás et al., 2014) и др.). В условиях, благоприятных для РСА-интерферометрии (отсутствие густой растительности и мощного снежного покрова), применение этого метода позволяет в значительной мере дополнять результаты наземных работ и существенно сокращать их объёмы. К сожалению, в России РСА-интерферометрия пока применяется лишь для решения отдельных, весьма немногочисленных задач.

Накопление архивных радарных снимков за почти тридцатилетний период, регулярная съёмка с новых спутников Sentinel-1A, -1B (S-1A, S-1B), бесплатное распространение

снимков этих спутников через интернет открывают широкие перспективы применения методов РСА-интерферометрии для мониторинга различных техногенных и природных процессов, включая оползни.

Постоянный рост антропогенной нагрузки в районе Большого Сочи активизирует процессы, приводящие к деформациям земной поверхности. Основные причины поверхностных деформаций — оползни и в некоторых случаях — просадки грунта. В большинстве случаев смещения при этих деформациях не являются катастрофическими и составляют порядка нескольких сантиметров в год. Однако экономический ущерб вследствие необходимости постоянного ремонта зданий и сооружений, дорожной сети и коммуникаций очень велик. Такие медленные смещения хорошо фиксируются методами РСА-интерферометрии. В целом прибрежная часть Большого Сочи благоприятна для применения методов InSAR: большое количество отражателей радарного сигнала вследствие высокой заселённости, сравнительно невысокого (до 500 м) и достаточно пологого рельефа позволяют минимизировать погрешности цифровых моделей рельефа (ЦМР), а отсутствие снега в зимний период даёт возможность использовать круглогодичную съёмку. Начиная с 2015 г. эта территория непрерывно снимается с восходящих и нисходящих орбит спутниками Sentinel-1.

В Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН) работы по применению методов РСА-интерферометрии при изучении и мониторинге оползневых структур в районе Большого Сочи ведутся с 2012 г. (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2014; Смольянинова, 2018, 2019; Kiseleva et al., 2014). Адлерский р-н является наиболее перспективным для использования InSAR. Плотная малоэтажная застройка обеспечивает большое количество устойчивых отражателей и в то же время затрудняет обнаружение медленных смещений полевыми методами. В этом районе было возведено огромное количество олимпийских объектов (Олимпийский парк, порт, дороги и развязки и пр.). Вопросы мониторинга устойчивости самих объектов и влияния масштабных строительных работ на процессы, приводящие к поверхностным деформациям, здесь особенно актуальны.

В настоящей работе представлены результаты изучения и мониторинга поверхностных деформаций (оползней и просадок) методами РСА-интерферометрии в Адлерском р-не, где, учитывая благоприятные для применения этого метода условия, следует ожидать максимально возможной достоверности интерферометрической обработки.

Использованные снимки и технологии обработки

Радарные снимки, использованные при расчётах и построении карт, представлены в *табл. 1*.

Таблица 1. РСА-снимки, использованные при расчётах

ALOS-1, трек 588A	Envisat, трек 35D	S-1A, трек 43A	S-1A, трек 123D
С 22.01.2007 по 17.09.2010 18 снимков	С 29.11.2010 по 23.03.2012 13 снимков	С 06.04.2015 по 29.11.2020 157 снимков	С 06.05.2015 по 23.11.2020 140 снимков

Обработка снимков производилась методом малых базовых линий (*англ.* Small Baseline Subset — SBAS) (Berardino et al., 2002) в пакете ENVI SARscape v.5.3. Имеющаяся в нашем распоряжении версия ENVI SARscape v.5.3.1 не позволяет обрабатывать снимки со спутника S-1B, поэтому для периода 2015–2020 гг. обрабатывались снимки только S-1A. Однако, учитывая длину серий снимков (во всех случаях больше 30) и малую величину регистрируемых смещений (практически во всех случаях до 80 мм/год), использование в данном случае только снимков S-1A с интервалом между съёмкой в 12 дней можно считать вполне оправданным.

При обработке снимков спутника ALOS-1 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) временные базовые линии варьировались от 46 до 365 дней, Envisat (*англ.* Environmental

Satellite) — от 30 до 365 дней, S-1A — от 12 до 36 дней. Фильтрация интерферограмм перед развёрткой фазы осуществлялась фильтром Гольдштейна (значения \max и \min коэффициентов соответственно 2,5 и 0,3). При развёртке фазы применялся алгоритм поиска потока минимальной стоимости с использованием триангуляции Делоне (Delaunay MCF). В развёртку включались только пиксели, значения когерентности для которых больше 0,2.

При вычитании топографической фазы использовалась цифровая модель рельефа SRTM v.4. Построение карт и их совместный анализ осуществлялись в свободном программном пакете с открытым кодом QGIS.

Для каждого набора снимков система наземных контрольных точек (*англ.* Ground Control Points — GCP) включала в себя несколько десятков пикселей с хорошей когерентностью, соответствующих сооружениям, расположенным на стабильных участках вдоль береговой линии и по руслам рек.

Учёт влияния атмосферных эффектов производился с привлечением высокочастотного временного фильтра с размером окна 365 дней и низкочастотного пространственного фильтра с размером окна 1200 м. Погрешность определения значений высот — меньше 5 м, а скоростей — не больше 5 мм/год. Точность определения значений высот и скоростей оценивалась на базе анализа пространственной когерентности в пакете ENVI SARscape.

В равнинных областях, где топографические отметки близки к нулю (Имеретинская низменность), рассчитывались вертикальные смещения (проседания) в предположении малости горизонтальных смещений. В этом случае смещения в направлении визирования спутника (*англ.* line of site — LOS) обусловлены в основном вертикальными движениями, т. е. являются проекцией вертикальных смещений на направление LOS.

Результаты выявления зон активных деформаций земной поверхности

В результате интерферометрической обработки для всех наборов снимков начиная с 2007 г. были вычислены поля смещений земной поверхности или техногенных объектов в направлении визирования спутника (U_{LOS}) и построены карты средних скоростей смещений V_{LOS} . На *рис. 1* (см. с. 58) представлены соответствующие карты V_{LOS} для Адлерского р-на. Участки, где абсолютные значения скоростей V_{LOS} больше 20 мм/год (области активных деформаций — ОАД), показаны в соответствии с направлением смещений относительно спутника красным (от спутника) или синим (к спутнику) цветом. При построении карт использовалась шкала скоростей движений оползней, принятая в Швейцарии (Raetzo, Loup, 2016; Strozzi et al., 2018), где спутниковая интерферометрия давно и широко используется для мониторинга оползневой активности. Кружками с цифрами отмечены ОАД (координаты указаны в *табл. 2*), для которых на *рис. 3* (см. с. 60) приведены графики временных серий смещений. В Имеретинской низменности ОАД обусловлены проседанием (голубые кружки на *рис. 1* и *2*, см. с. 59), а на склонах (с отличной от нуля топографией) — оползневыми процессами (наиболее значительные оползневые участки отмечены жёлтыми кружками на *рис. 1*). Отметим, что смещения вниз по склону, обращённому от спутника, всегда отрицательные, а в смещениях по пологому склону, обращённому к спутнику, может преобладать горизонтальная компонента, поэтому суммарное смещение может оказаться положительным. На картах *рис. 1* хорошо видно, что в подавляющем большинстве случаев интерферометрические данные покрывают территории, где имеются хорошо отражающие радарный сигнал здания и сооружения, в то время как области оползневых проявлений по наземным данным (Вожик, 2016) (розовые контуры) зафиксированы в основном на незастроенных участках. Это справедливо и для других районов Большого Сочи (Смольянинова и др., 2018).

По картам поверхностных деформаций, построенным по снимкам со спутника S-1A за период 2015–2020 гг. (см. *рис. 1а, б*), всего было выделено более 20 активных оползневых участков размерами в поперечнике от нескольких десятков до сотен метров. Более половины из них по наземным данным ранее не отмечались.

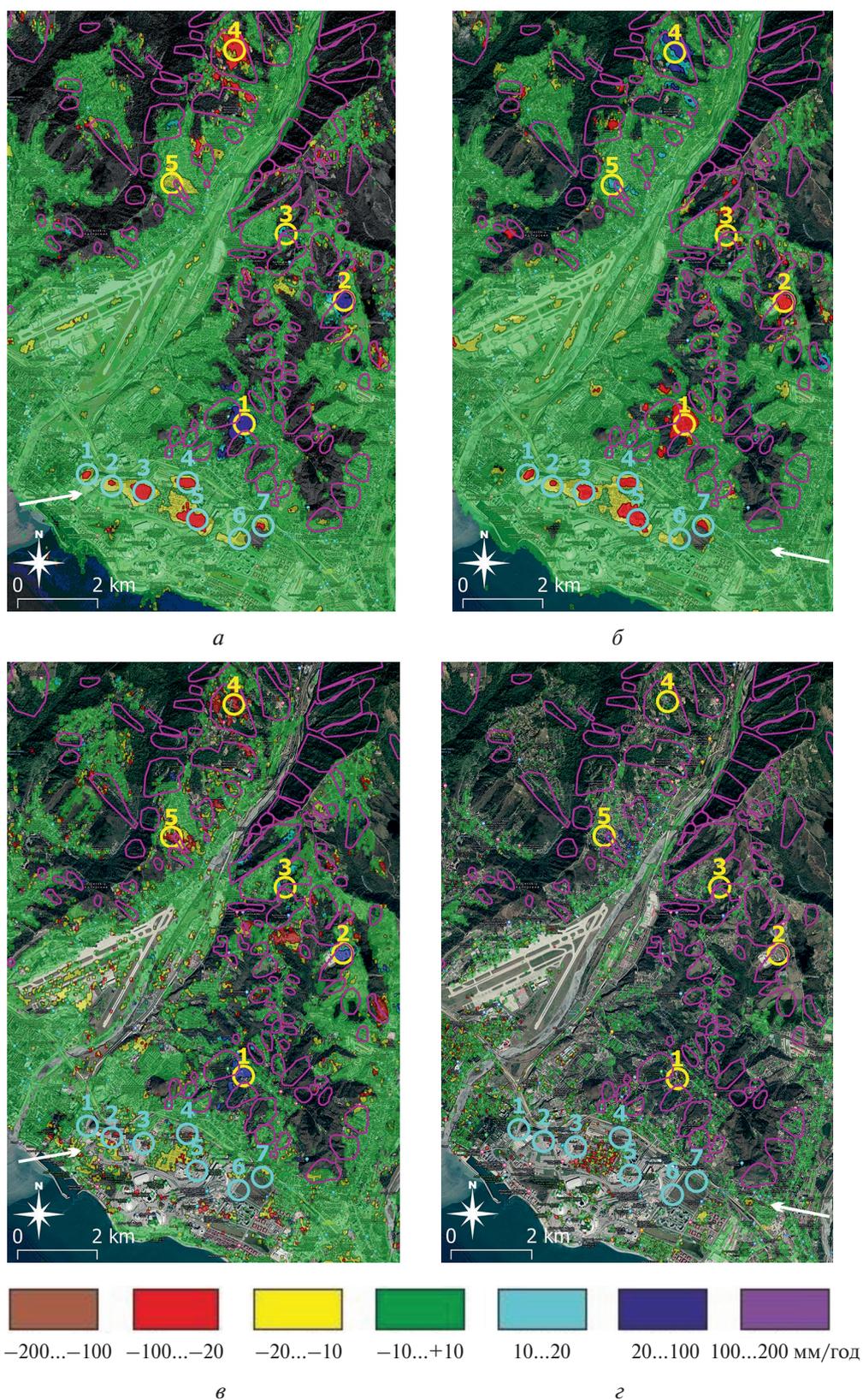
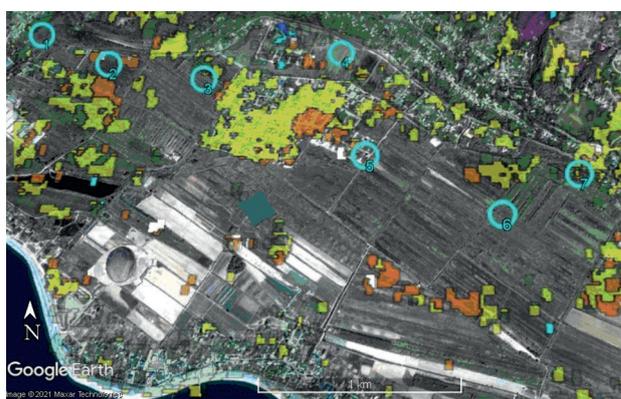


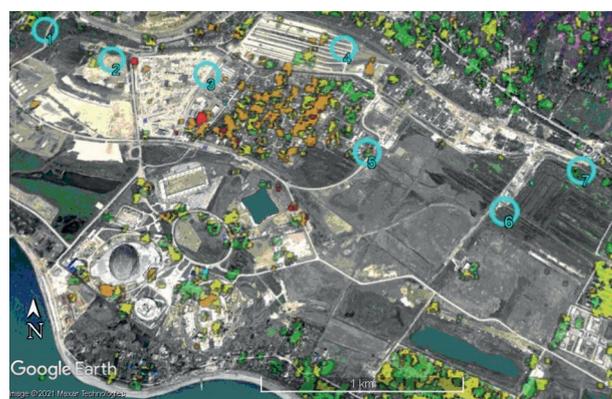
Рис. 1. Карты средних скоростей смещений на снимках Google Карты (англ. Google Maps), полученные в результате расчётов методом SBAS в пакете ENVI SARscape по PCA-снимкам со спутников: а — S-1A, трек 43A, 2015–2020 гг.; б — S-1A, трек 123D, 2015–2020 гг.; в — ALOS-1, трек 588A, 2007–2010 гг.; г — Envisat, трек 35D, 2010–2012 гг. Жёлтые кружки — ОАД, оползневые участки; голубые кружки — ОАД, участки проседания. Графики временных серий смещений приведены соответственно на рис. 3а и б. Розовые контуры — области оползневых проявлений по наземным данным (Вожик, 2016). Направления визирования спутника показаны белыми стрелками

Таблица 2. ОАД, показанные на рис. 1 и 2

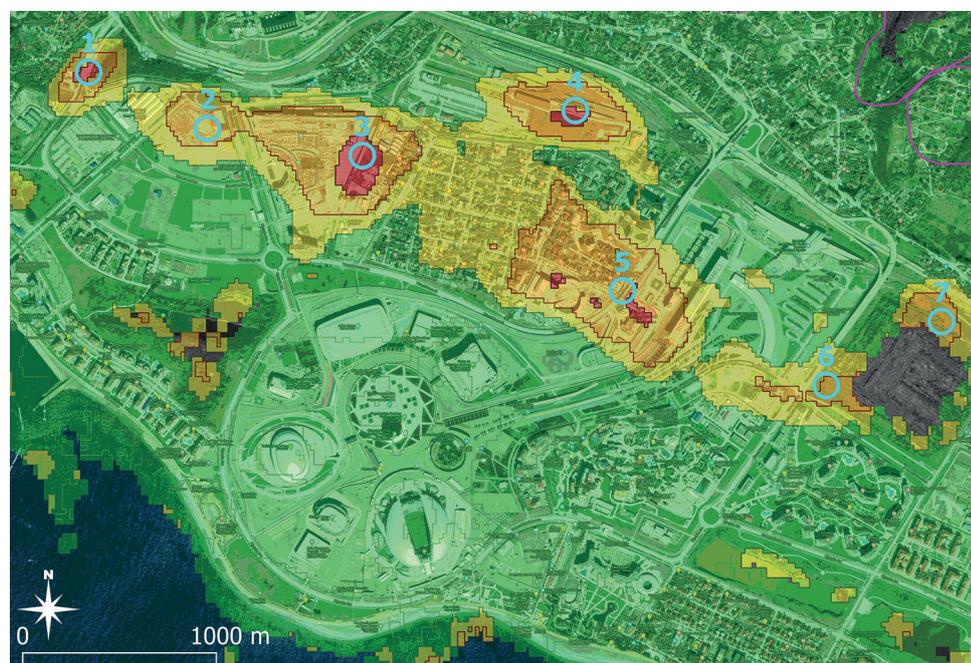
Оползневые участки (жёлтые кружки)				Области проседания (голубые кружки)			
№	Местоположение оползневого участка	Координаты центра области, град		№	Местоположение области проседания	Координаты центра области, град	
1	ул. Коммунаров	39,976	43,426	1	Эстакада на ул. Трумфальная	39,941	43,418
2	ул. Комарова	39,998	43,445	2	Медиациентр	39,946	43,416
3	ул. Владимировская	39,985	43,457	3	ул. Журналстов	39,953	43,415
4	с. Высокое	39,974	43,487	4	ул. Насыпная	39,963	43,416
5	с. Молдовка	39,960	43,465	5	ул. Триумфальная	39,965	43,410
				6	ул. Международная	39,975	43,407
				7	Природный орнитологический парк	39,980	43,409



а



б



в

Рис. 2. Карты средних скоростей вертикальных смещений по РСА-снимкам со спутников: а — ALOS, трек 588А, 2007–2010 гг. (снимок сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth) 2007 г.); б — Envisat, трек 35D, 2010–2012 гг. (снимок Google Earth 2010 г.); в — S-1А, трек 43А, 2015–2020 гг. (снимок Google Maps 2020 г.)

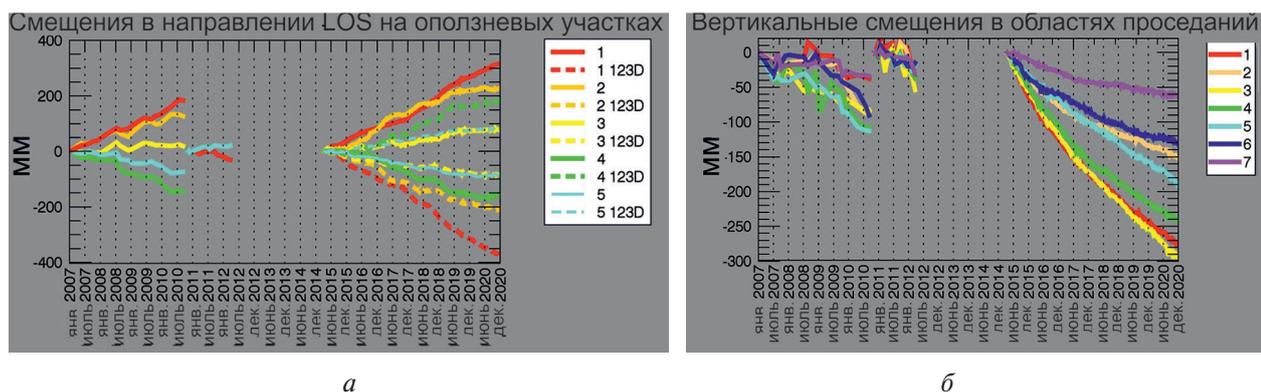


Рис. 3. Временные серии смещений на оползневых участках (жёлтые кружки на рис. 1) (а) и в зонах проседания (голубые кружки на рис. 1 и 2, координаты в табл. 2) (б); спутники ALOS-1 (2007–2010), Envisat (2010–2012), S-1A (2015–2020). Маркировка кривых соответствует номерам кружков. Для периода 2015–2020 гг. (S-1A) сплошными линиями обозначены временные серии для трека 43А, пунктирными — для трека 123D

Также по данным спутника S-1A за 2015–2020 гг. было выделено 7 зон проседания в Имеретинской низменности (голубые кружки на рис. 1). На рис. 2 представлены построенные по снимкам из табл. 1 карты вертикальных смещений поверхности для Имеретинской низменности (в предположении отсутствия горизонтальных смещений). Поскольку вертикальные смещения, вычисленные по снимкам с восходящего и нисходящего треков, в данном случае практически не различаются, для периода 2015–2020 гг. приводится только карта, построенная по данным с восходящего трека 43А. Кстати, хорошее совпадение значений с восходящих и нисходящих треков указывает на существенное преобладание вертикальных смещений.

Для ОАД, представленных в табл. 2, были построены временные серии смещений (см. рис. 3).

Следует пояснить, что структура отражающих радарный сигнал объектов в настоящее время (съёмка со спутника S-1A) и до начала масштабных строительных работ (т.е. когда производилась съёмка со спутника ALOS-1 — 2007–2010 гг.) существенно различается. Поэтому координаты точек, для которых построены временные серии на рис. 3 и 5 (см. с. 61) для разных периодов времени, не совпадают, но находятся в пределах областей, отмеченных кружками на картах рис. 1 и 2.

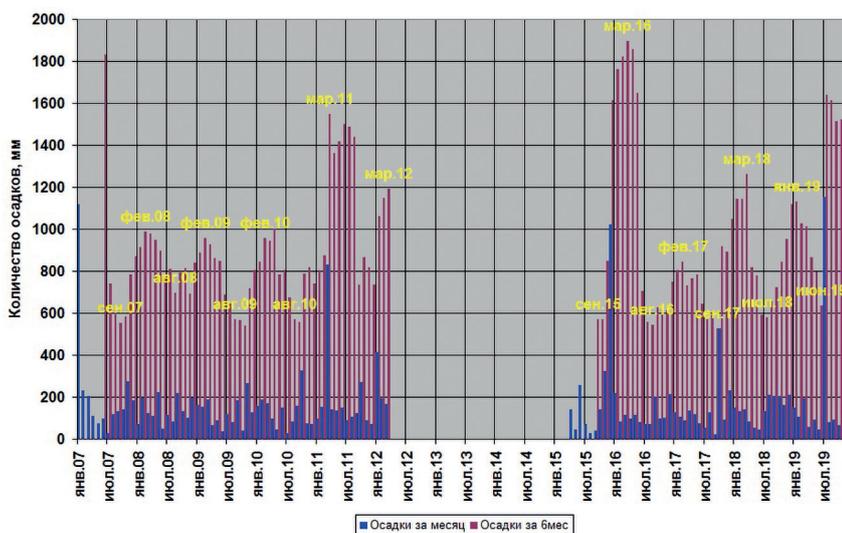
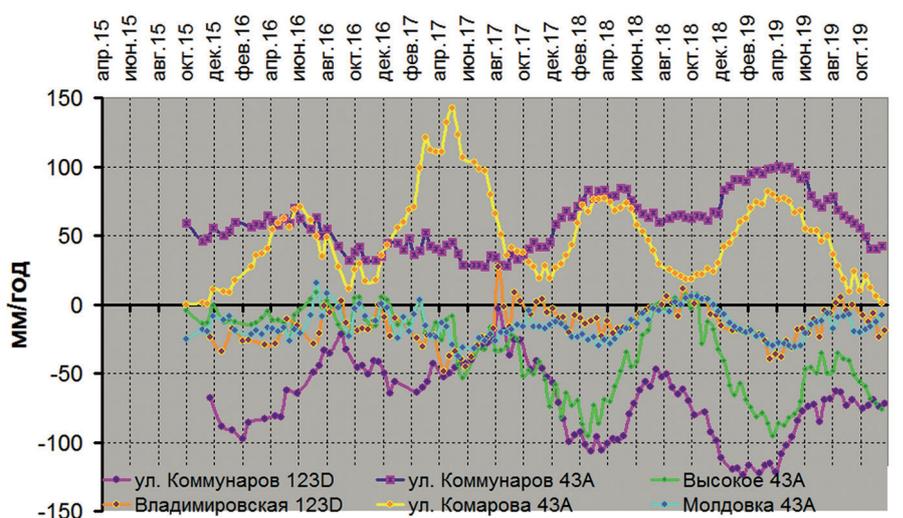


Рис. 4. Выпадение осадков в период 2007–2020 гг. (<http://meteocenter.net>)

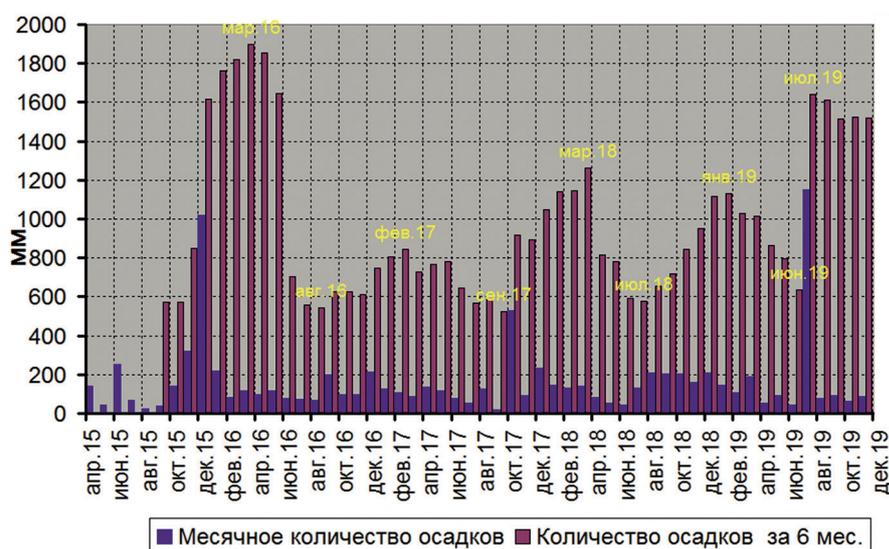
Интерпретация результатов

Основным фактором, определяющим динамику смещений в ОАД на оползневых участках, является обводненность грунтов, которая в первую очередь зависит от количества выпавших осадков.

На *рис. 4* (см. с. 60) приведены сведения о количестве осадков за период 2007–2020 гг. по архивным данным метеостанции Сочи (Адлер) (<http://meteocenter.net>). Красным цветом показано количество осадков, просуммированное в скользящем окне длительностью 6 мес. Хорошо видна периодичность максимумов и минимумов суммарного количества осадков, выпадающих за полугодовые интервалы. Максимумы наблюдаются в феврале – марте, а минимумы — в августе – сентябре.



а



б

Рис. 5. Средние за 6-месячные интервалы значения скоростей V_{LOS} (S-1A, трек 43A) (*а*); выпадение осадков в период 2015–2020 гг. (<http://meteocenter.net>) (*б*)

По графикам временных серий смещений на оползневых участках (см. *рис. 3а*) отмечается неравномерность движений на рассматриваемых склонах на протяжении всего периода наблюдений. В скользящем временном окне были вычислены средние скорости смещений V_{LOS}

за 6-месячные интервалы. На *рис. 5а* приводятся графики изменений во времени этих значений для данных со спутника S-1A (2015–2020), интервалы между наблюдениями для которого составляют 12 дней, что позволяет получить наиболее гладкие кривые. Для всех участков характерна периодичность максимумов и минимумов средних скоростей V_{LOS} . Времена пиковых значений на разных участках совпадают в пределах 1–2 мес.

Сравнение с графиком количества осадков за полугодовые интервалы (см. *рис. 5б*) показало, что экстремумы кривых средних значений V_{LOS} за 6-месячные интервалы коррелируют с экстремумами гистограмм суммарного за полгода количества осадков. Максимумы скоростей смещений приходятся на февраль – апрель, а минимумы – на август – октябрь.

Таким образом, максимумы скоростей смещений несколько сдвинуты относительно максимумов суммарных за полгода количеств осадков. Величина этого сдвига неодинакова для разных оползневых участков и, очевидно, зависит от их геологического строения, определяющего время просачивания воды до поверхностей скольжения и размокания пластичных грунтов.

Связи динамики просадок в Имеретинской низменности (см. *рис. 3б*) с количеством выпадающих осадков не обнаружено. Для всех выделенных областей (1–7) проседание началось в 2008–2009 гг., т.е. с началом освоения этой территории. Существовавшие до этого дренажные каналы справлялись со своей задачей, и погружения на рассматриваемых участках не наблюдалось. В настоящее время в областях 2, 6, 7 наблюдается процесс стабилизации: скорости вертикальных смещений падают с 30–50 до 10–15 мм/год. В областях же 1, 3, 5 проседание продолжает неуклонно расти и в разных точках колеблется в диапазоне 30–60 мм/год. Наибольшее проседание за весь период наблюдений составляет около 300 мм (ул. Журналистов). Таким образом, кривые вертикальных смещений поверхности позволяют детально оценить эффективность работы новых дренажных систем и мероприятий по стабилизации оснований фундаментов. Местоположение идентифицированных по спутниковым данным областей проседания согласуется с результатами наземных исследований, изложенными в работах (Гудкова, 2016; Потапов и др., 2012; Телков и др., 2012). Более подробно вопросы проседания в Имеретинской низменности рассмотрены в публикации (Смольянинова и др., 2020).

Выводы

На преобладающих в районах Большого Сочи территориях с плотной индивидуальной застройкой, где медленные смещения с трудом фиксируются наземными методами, InSAR позволяет выделять множество новых зон активных оползневых деформаций, а также определять степень активности в период съёмки ранее закартированных наземными методами оползневых структур.

Привлечение архивных спутниковых радарных снимков и метеоданных позволяет успешно изучать динамику оползневых склонов в этом районе и прогнозировать области активизации смещений.

Полученные результаты показывают, что методы РСА-интерферометрии позволяют также с высокой степенью детальности анализировать динамику проседания территории Имеретинской низменности за последние 13 лет, т.е. с момента, предшествующего началу освоения этой территории, и до настоящего времени, проводить контроль мероприятий по дренажу территории, консолидации грунтов и укреплению фундаментов сооружений. Идентифицированные здесь просадки являются существенными, поэтому в области олимпийских объектов целесообразно выполнять регулярный мониторинг смещений, в том числе и методами спутниковой РСА-интерферометрии.

Применение РСА-интерферометрии не требует больших финансовых затрат, а совместная интерпретация результатов с наземными данными позволят значительно повысить эффективность существующих систем мониторинга поверхностных деформаций.

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 окт. 2016 г., Москва: Презентационные материалы круглого стола «Государственный мониторинг состояния недр и региональные гидрогеологические работы». 2016. 71 с. URL: http://www.specgeo.ru/pdf/doklad_viii_geolog_04.pdf.
2. *Гудкова Н. К.* Мониторинг геологической среды олимпийских объектов в Сочи // Системы контроля окружающей среды. 2016. Т. 3. № 23. С. 130–133.
3. *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.
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. Российской акад. наук. Физика Земли. 2014. № 4. С. 120–130. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
5. *Потапов А. Д., Лейбман М. Е., Лаврусевич А. А., Чернышев С. Н., Маркова И. М., Бакалов А. Ю., Крашенинников В. С.* Мониторинг объектов инженерной защиты на Имеретинской низменности // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2012. № 5. С. 406–413.
6. *Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Дмитриев П. Н., Михайлов В. О.* О возможности применения РСА-интерферометрии с использованием снимков со спутников Sentinel-1 при изучении оползневой активности в районе горного кластера Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111.
7. *Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Михайлов В. О.* Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 147–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
8. *Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н.* Изучение и мониторинг зон проседания в Имеретинской низменности (район Большого Сочи) методом РСА-интерферометрии разночастотных спутниковых радарных снимков за период 2007–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 103–113. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
9. *Телков Ф. С., Наумов М. С., Исаков В. А.* Факторы инженерно-геологического риска на территории Имеретинской низменности // Проблемы снижения природных опасностей и рисков: материалы Международной научно-практ. конф. «Геориск-2012». М.: РУДН, 2012. Т. 2. С. 324–330.
10. *Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2002. V. 40. No. 11. P. 2375–2383.
11. *Carlà T., Intrieri E., Raspini F., Bardi F., Farina P., Ferretti A., Colombo D., Novali F., Casagli N.* Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR // Scientific Reports. 2019. V. 9. No. 1. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50792-y>.
12. *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.
13. *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.
14. *Raetzo H., Loup B.* Protection Against Mass Movement Hazards. Guideline for the Integrated Hazard Management of Landslides, Rockfall and Hillslope Debris Flows. Federal Bern, Switzerland: Office for the Environment FOEN, 2016. 97 p.
15. *Solari L., Del Soldato M., Bianchini S., Ciampalini A., Ezquerro P., Montalti R., Raspini F., Moretti S.* From ERS 1/2 to Sentinel-1: Subsidence Monitoring in Italy in the Last Two Decades // Frontiers in Earth Science. 2018. V. 6. Art. No. 149. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00149>.
16. *Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M.* Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 8. Art. No. 1351. URL: <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.
17. *Strozzi T., Klimees J., Frey H., Caduff R., Huggel C., Wegmuller U., Rapre A.* Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras

- of Peru // *Remote Sensing of Environment*. 2018. V. 217. P. 111–125. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>.
18. Tomás R., Romero R., Mulas J., Marturià J. J., Mallorquí J. J., Lopez-Sanchez J. M., Herrera G., Gutiérrez F., González P. J., Fernández J., Duque S., Concha-Dimas A., Cocksley G., Castañeda C., Carrasco D., Blanco P. Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain // *Environmental Earth Sciences*. 2014. V. 71. P. 163–181. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2422-z>.

Detection and monitoring of active deformation areas in the Adler region of the Big Sochi area based on multifrequency InSAR data for the period 2007–2020

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

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

We present results of estimation of displacements of the Earth's surface and buildings in the Adler region of the Big Sochi obtained by InSAR methods. We used multifrequency radar images from ascending and descending orbits covering thirteen-year time interval including ALOS-1 (18 images, 2007–2010), Envisat (12 images, 2011–2012), Sentinel-1A (about 300 images, 2015–2019). SBAS ENVI SARAscape software was used for processing. Deformation maps for all the datasets were created. Active deformation areas (ADA) due to landslides and subsidence were revealed. We identified more than 20 active landslides which had not been fixed by field works and 7 subsidence areas in the Imereti lowland. Time series graphs for the period 2007–2020 were plotted and compared with archive precipitation data. The periodicity of maximum and minimum values of mean displacement rates was determined. The times of extreme displacement rate values for different landslides vary within 1–2 months. Maximum displacement rate values were observed in February–March, and minimum values — in August–October. We have not noticed any correlation of subsidence in the Imereti lowland with precipitation. Subsidence curves there demonstrate general tendencies of subsidence and efficiency of drainage and stabilizing systems. Maximum subsidence was revealed in the vicinity of the Zhurnal'istov Str. — up to 300 mm for the period 2015–2020. The obtained surface deformation maps agree quite well with ground data. In the densely populated Adler region where it is often difficult to fix small displacements incorporating low cost InSAR helps to add new information to data already available from field works. The presented results for the Adler region demonstrate perspectives of using InSAR in other coastal parts of the Black Sea.

Keywords: SAR, InSAR, satellite monitoring, landslides, ground subsidence, Sentinel-1, ALOS-1, Envisat, Adler region, Imereti lowland, Big Sochi

Accepted: 01.07.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65

References

1. Vozhik A. A., Risk assessment of exogenetic geological processes in the course of state monitoring of the state of the subsurface, *8-i Vserossiiskii s'ezd geologov 26–28 oktyabrya 2016 g., Moscow, 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"), 2016, 71 p., available at: http://www.specgeo.ru/pdf/doklad_viii_geolog_04.pdf (in Russian).
2. Gudkova N. K., Monitoring of the geological environment of Olympic facilities in Sochi, *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2016, Vol. 3, No. 23, pp. 130–133 (in Russian).

3. Dmitriev P. N., Golubev V. I., Isaev Yu. S., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolyaninova E. I., On processing and interpretation of SAR interferometry data in case of landslide monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 130–142 (in Russian).
4. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova E. I., Dmitriev P. N., Golubev V. I., Timoshkina E. P., Khairtadinov S. A., Isaev Yu. S., Dorokhin K. 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. Potapov A. D., Leibman M. E., Lavrusevich A. A., Chernyshev S. N., Markova I. M., Bakalov A. Yu., Krasheninnikov V. S., Monitoring of engineering protection of objects in the Imeretinskaya lowland, *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2012, No. 5, pp. 406–413 (in Russian).
6. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Dmitriev P. N., Mikhailov V. O., On the possibility of using Sentinel-1 SAR interferometry to study landslide activity in the mountain cluster of the Big Sochi area, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 103–111 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-103-111.
7. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Sentinel-1 InSAR for investigation of active deformation areas: case study of the coastal region of the Big Sochi, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
8. 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.
9. Telkov F. S., Naumov M. S., Isakov V. A., Factors of engineering and geological risk in the territory of the Imerety lowland, *Problemy snizheniya prirodnykh opasnostei i riskov (Problems of decrease in natural hazards and risks, Proc. Intern. Scientifically-Practical Conf. "Georisk-2012")*, Moscow: Rossiiskii universitet druzhby narodov, 2012, Vol. 2, pp. 324–330 (in Russian).
10. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2002, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383.
11. Carlà T., Intrieri E., Raspini F., Bardi F., Farina P., Ferretti A., Colombo D., Novali F., Casagli N., Perspectives on the prediction of catastrophic slope failures from satellite InSAR, *Scientific Reports*, 2019, Vol. 9, No. 1, 9 p., available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50792-y>.
12. 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.
13. 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.
14. Raetz H., Loup B., Protection Against Mass Movement Hazards, *Guideline for the Integrated Hazard Management of Landslides, Rockfall and Hillslope Debris Flows*, Bern, Switzerland: Federal Office for the Environment FOEN, 2016, 97 p.
15. Solari L., Del Soldato M., Bianchini S., Ciampalini A., Ezquerro P., Montalti R., Raspini F., Moretti S., From ERS 1/2 to Sentinel-1: Subsidence Monitoring in Italy in the Last Two Decades, *Frontiers in Earth Science*, 2018, Vol. 6, Art. No. 149, available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00149>.
16. Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M., Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 8, Art. No. 1351, available at: <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.
17. Strozzi T., Klimees J., Frey H., Caduff R., Huggel C., Wegmuller U., Rapre A., Satellite SAR interferometry for the improved assessment of the state of activity of landslides: A case study from the Cordilleras of Peru, *Remote Sensing of Environment*, 2018, Vol. 217, pp. 111–125, available at: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.014>.
18. Tomás R., Romero R., Mulas J., Marturià J. J., Mallorquí J. J., Lopez-Sanchez J. M., Herrera G., Gutiérrez F., González P. J., Fernández J., Duque S., Concha-Dimas A., Cocksley G., Castañeda C., Carrasco D., Blanco P., Radar interferometry techniques for the study of ground subsidence phenomena: A review of practical issues through cases in Spain, *Environmental Earth Sciences*, 2014, Vol. 71, pp. 163–181, available at: <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2422-z>.