

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.

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 Олимпийского парка в Имеретинской низменности методами радарной спутниковой интерферометрии. Используются разночастотные радарные снимки, покрывающие двенадцатилетний период с 2007 по 2019 г., в том числе снимки спутников ALOS-1 (18 снимков, 2007–2010 гг.), Envisat (13 снимков, 2011–2012 гг.), Sentinel-1 (более 300 снимков, 2015–2019 гг.). На территории Имеретинской низменности по спутниковым данным обнаружено шесть основных областей просадок. За последние два года максимальные проседания достигают 150 мм. Обработка снимков производилась с использованием технологий SBAS в пакете ENVI SARscape и PS StaMPS/MTI. Построены карты вертикальных смещений поверхности для периодов, соответствующих сериям снимков со всех спутников. Вертикальные смещения (проседания) рассчитаны в предположении, что горизонтальные смещения невелики, в этом случае зафиксированные смещения в направлении визирования спутника равны проекции вектора смещений по вертикали на направление на спутник. Это предположение верифицируется сопоставлением результатов, полученных с восходящего и нисходящего треков. Построенные для выделенных зон проседания графики временных серий вертикальных смещений поверхности позволяют выделять периоды постоянных и изменяющихся во времени скоростей смещений, сопоставлять их с проводимыми строительными работами. Полученные карты смещений хорошо согласуются с наземными данными. Идентифицированные просадки оказываются существенными, поэтому в области олимпийских объектов целесообразно выполнять регулярный мониторинг смещений, в том числе и методами спутниковой РСА-интерферометрии.

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

Одобрена к печати: 29.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113

Введение

Спутниковая радарная интерферометрия получает всё более широкое применение для решения различных задач, требующих данных о смещениях земной поверхности или техногенных объектов. Наличие архивных радарных снимков за последние три десятка лет позволяет применять методы РСА-интерферометрии (использование спутниковых снимков, выполненных радарными с синтезированной апертурой) для изучения динамики развития во времени процессов, создающих деформации земной поверхности.

До 2007 г., когда началось строительство ключевых объектов прибрежного кластера Олимпиады «Сочи-2014» (XXII Олимпийские зимние игры), Имеретинская низменность была практически незастроенной. Значительные площади были заболочены и периодически подтоплялись. Здесь широко распространены специфические органоминеральные, так называемые слабые грунты, которые при обводнении теряют несущую способность, что может приводить к просадкам, выдавливанию грунтов из-под насыпей. В процессе строительства олимпийских объектов создана новая дренажная система, которая заменила существовавшие ранее дренажные каналы. Одновременно проводились мероприятия по стабилизации

и консолидации грунтов оснований. Для оценки эффективности этих мероприятий необходим мониторинг смещений зданий и земной поверхности.

В мировой практике для мониторинга полей смещений различного генезиса широко используют спутниковые снимки, выполненные радарами с синтезированной апертурой. Обзоры можно найти, например, в работах (Crosetto et al., 2016; Solari et al., 2018; Tomás et al., 2014). Методология и примеры использования методов РСА-интерферометрии при изучении и мониторинге активных деформаций поверхности в районе Большого Сочи приведены в публикациях (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2014; Смольянинова и др., 2018, 2019; Kiseleva et al., 2014). В настоящей работе демонстрируется возможность использования многолетних рядов архивных снимков со спутников ALOS-1 (*англ.* Advanced Land Observing Satellite) (2007–2010), Envisat (*англ.* Environmental Satellite) (2010–2012) и Sentinel-1 (далее — S-1) (начиная с 2015 г.) для изучения динамики процессов проседания земной поверхности и инфраструктуры олимпийских объектов в Имеретинской низменности.

Район исследований, исходные данные и технологии обработки

Имеретинская низменность расположена на южном склоне Большого Кавказского хребта в междуречье рек Мзымта и Псоу. Территория вытянута вдоль побережья приблизительно на 8 км, простирается вглубь от берега на 0,8–2,0 км (*рис. 1а*) и незначительно приподнята над уровнем моря — в среднем от 1,5 до 3 м. До 2007 г. — начала строительства здесь объектов Олимпиады «Сочи-2014» — основными элементами ландшафта были болота и поля (*рис. 1б*). Подтопляемая территория, которая находилась в основном в центральной части низменности, занимала около 40 % общей площади. Распространённые здесь слабые грунты: заторфованные глины, переувлажнённые супеси, пески, содержащие пылеватую фракцию, — теряют при обводнении несущую способность, выдавливаются из-под насыпных грунтов и строений, что может приводить к просадкам земной поверхности и сооружений.

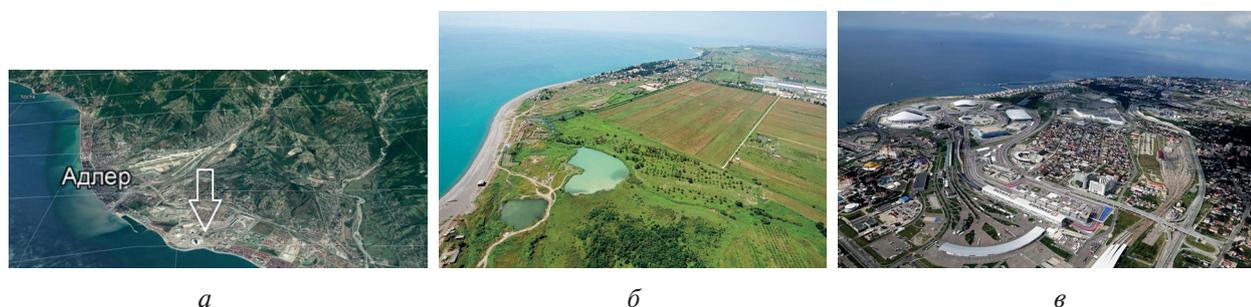


Рис. 1. Снимок района исследований (*а*, показан стрелкой); фотографии 2007 (*б*) и 2019 гг. (*в*)

Сельскохозяйственные угодья и болота неблагоприятны для применения РСА-интерферометрии вследствие низкой отражательной способности и, как следствие, плохой когерентности снимков при повторных съёмках, поэтому в настоящей работе не анализировались радарные снимки за период до начала здесь строительных работ в 2007 г. Полный перечень радарных снимков, использованных при расчётах, представлен в *таблице*.

РСА-снимки, использованные при расчётах

Спутник	ALOS-1 588A	Envisat 35D	S-1A 43A	S-1B 43A	S-1A 123D
Период	22.01.2007– 17.09.2010	29.11.2010– 23.03.2012	06.04.2015– 17.12.2019	07.01.2017– 07.04.2019	06.05.2015– 23.12.2019
Количество снимков	18	13	120	70	113

Обработка снимков проводилась с использованием двух технологий, основанных на анализе серий радарных изображений (MT-InSAR): метода малых базовых линий (*англ.* Small Baseline Subset — SBAS) (Berardino et al., 2002) в пакете ENVI SARscape v.5.3.1 и технологии устойчивых отражателей PSInSAR в свободном пакете StaMPS/MTI v.4.1b (Hooper et al., 2004, 2007). Имеющаяся в нашем распоряжении версия ENVI SARscape v.5.3.1 не позволяет обрабатывать снимки со спутника S-1B. Поэтому для периода 2015–2019 гг. в пакете ENVI SARscape обрабатывались снимки только S-1A, а в пакете StaMPS/MTI — снимки S-1A и S-1B совместно. Для StaMPS/MTI подготовка интерферограмм снимков ALOS-1 и Envisat проводилась в свободном пакете DORIS v.4.02, а снимков S-1 — в свободном пакете SNAP v.7. При вычитании топографической фазы использовалась цифровая модель рельефа SRTM v.4. Для расчётов снимки S-1A, трек 43A были разделены на две серии по периодам съёмки: 06.04.2015–22.09.2017 и 04.10.2017–17.12.2019. Это позволило ускорить процесс подбора параметров обработки и уменьшить время вычислений.

Построены карты смещений поверхности для периодов, соответствующих сериям снимков. Вертикальные смещения (проседания) рассчитаны в предположении, что в данном случае горизонтальные смещения малы, а смещения в направлении визирования спутника (*англ.* line of site — LOS) обусловлены в основном вертикальными движениями, т.е. представляются проекцией вертикальных смещений на направление LOS. Для учёта горизонтальных смещений необходимо применение специальных технологий (см., например, работу (Михайлов и др., 2012)). Обработка снимков с привлечением двух технологий с разными алгоритмами обработки делает возможным кросс-валидацию результатов. Для всех выявленных зон проседания построены графики временных серий вертикальных смещений поверхности, которые позволяют выделять периоды стабильности и переменных скоростей проседания, сопоставлять их с проводимыми строительными работами.

Результаты изучения смещений земной поверхности

На современной карте вертикальных смещений поверхности на территории Имеретинской низменности, построенной по снимкам со спутника S-1A за период 2017–2019 гг., было выделено шесть основных областей просадок (*рис. 2*). Максимальные просадки за эти два года достигают 15 см.

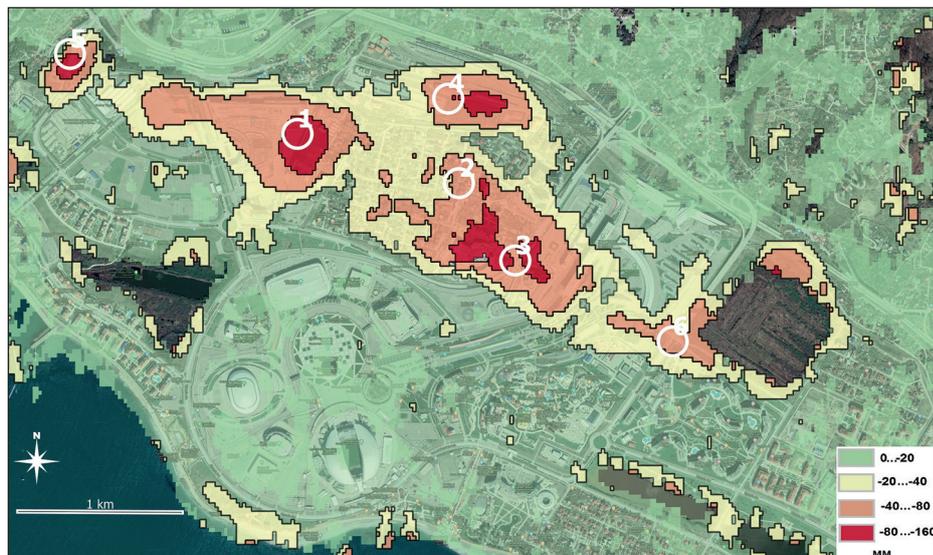


Рис. 2. Карта современных вертикальных смещений поверхности (за два года), построенная с использованием снимков спутника Sentinel-1A (SBAS ENVI SARscape), трек 43A 2017-2019. Цифрами обозначены выделенные зоны просадок; кругами — области, для которых построены графики временных серий (см. ниже)

Динамика проседания во времени этих зон была исследована по временным сериям, построенным с привлечением снимков, сделанных последовательно со спутников ALOS-1 (18 снимков, 2007–2010 гг.), Envisat (13 снимков, 2011–2012 гг.) и S-1A/B (более 300 снимков с восходящего и нисходящего треков, 2015–2019 гг.). Результаты, полученные при обработке снимков по методу SBAS в пакете ENVI SARscape v.5.3.1 и с помощью технологии PS StaMPS/MTI v.4.1b, различаются незначительно, поэтому в настоящей работе мы приводим карты скоростей деформаций поверхности, построенные только в пакете ENVI SARscape (рис. 3). Синтез результатов, полученных с использованием обоих алгоритмов, приведён в следующем разделе (см. рис. 7).

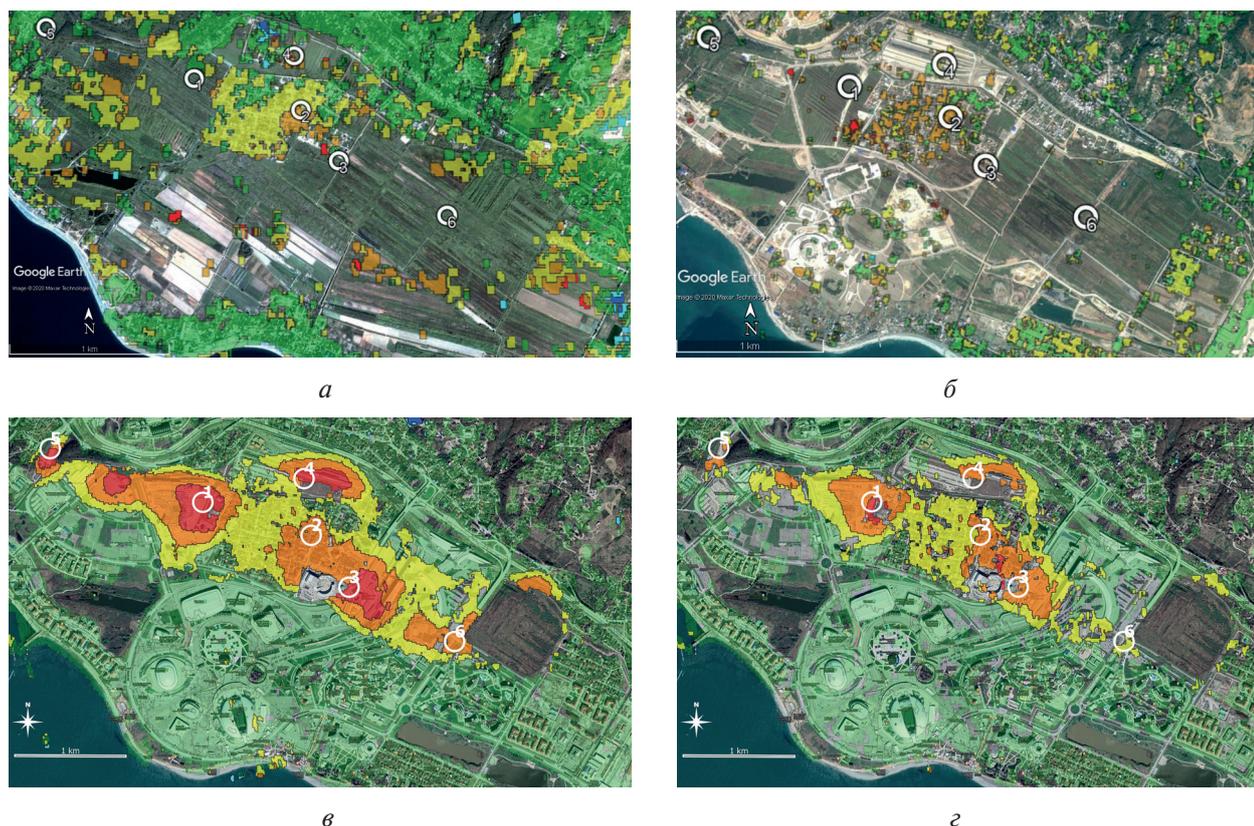


Рис. 3. Карты средних скоростей вертикальных смещений на снимках сервиса Google Планета Земля (англ. Google Earth), полученные в результате расчётов методом SBAS в пакете ENVI SARscape по PCA-снимкам со спутников: а — ALOS-1 2007–2010, трек 588A, 2007 г.; б — Envisat 2010–2012, трек 35D, 2010 г.; в — S-1A 2015–2017, трек 43A, 2017 г.; г — S-1A 2017–2019, трек 43A, 2019 г.

Карты вертикальных скоростей смещений по снимкам со спутника S-1A (2015–2019) с восходящего (43A) и нисходящего (123D) треков практически не отличаются, поэтому на рис. 3 представлены карты вертикальных смещений только по снимкам спутника S-1A с трека 43A. Сходство полей вертикальных смещений, рассчитанных по снимкам с восходящего и нисходящего треков, подтверждает правильность предположения о малой величине горизонтальной компоненты смещений.

На рис. 4 (см. с. 107) представлены графики временных серий вертикальных смещений для характерных участков, отмеченных на рис. 2 и 3 белыми кружками.

Графики на рис. 4 скомпилированы по результатам расчётов для всех наборов снимков. На период с 2012 по 2015 г. снимки данной территории отсутствуют. На участках 1, 3, 5, 6 до 2012 г. отражатели радарного сигнала не были идентифицированы (см. рис. 3а и б). Это была неосвоенная территория, где строительство началось позже, поэтому графики временных серий на рис. 4в начинаются только с 2015 г.

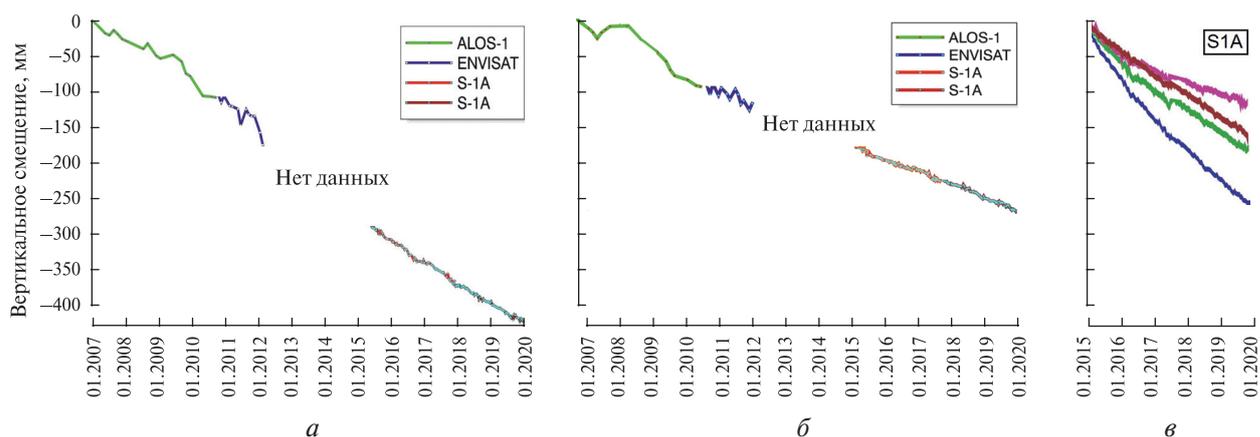


Рис. 4. Графики временных серий вертикальных смещений для участков проседания, обозначенных на рис. 2 и 3 белыми кружками и цифрами: а — участок 2, б — участок 4, в — участки 1 (синяя линия), 3 (зелёная), 5 (коричневая), 6 (сиреневая линия)

Интерпретация результатов

По картам скоростей вертикальных смещений (см. рис. 3) видно, что за весь период 2007–2019 гг. получить данные о скоростях вертикальных движений на территории выделенных современных зон проседания 1–6 удалось только на участках 2 (пос. Мирный) и 4 (ж.-д. узел на ул. Насыпная). На остальных участках вертикальные движения зафиксированы только после начала строительных работ. В пос. Мирный и до 2007 г. существовала плотная индивидуальная застройка, что обеспечивало устойчивое отражение радарного сигнала при съёмке со спутника ALOS-1 в 2007–2010 гг. График временной серии в районе ул. Кувшинок представлен на рис. 4а. В период 2007–2009 гг. скорость проседания составляла в среднем около 30 мм/год, причём до лета 2008 г. она была ниже среднего значения, а с лета 2008 г. — выше. В это время началась реновация посёлка. На смену старым постройкам были возведены двух-трёхэтажные дома и отели. Средняя скорость проседания с лета 2008 г. увеличилась здесь до 40–50 мм/год. За период 2015–2019 гг. суммарное вертикальное смещение на этом участке составило около 120 мм, т. е. величины скорости проседания вернулись к значениям, которые были до начала строительства (около 30 мм/год). Полагая эту величину такой же и в период 2012–2015 гг., на который снимки отсутствуют, можно предположить, что максимальное общее проседание на участке 2 за весь временной интервал 2007–2019 гг. составляет порядка 400 мм. Уровень грунтовых вод в пос. Мирный находится очень близко к поверхности, вдоль улиц проложены дренажные канавы (рис. 5а, см. с. 108), повсеместно видны следы многократного ремонта дорожного полотна (рис. 5б).

На участке 4 (ул. Насыпная, график временной серии, см. рис. 4б) проседание началось летом 2008 г., и до осени 2009 г. его скорость была приблизительно такой же, как и на участке 2 в этот же период времени, т. е. примерно 40–50 мм/год. Потом скорость снизилась до 25–30 мм/год и оставалась на этом уровне в течение 2015–2019 гг. В предположении, что, как и на участке 2, в период отсутствия снимков 2012–2015 гг. скорость проседания неизменна и равна скорости до и после этого временного интервала, т. е. порядка 25 мм/год, оценка общего проседания на участке 4 за весь период наблюдений 2007–2019 гг. составила около 300 мм.

Как уже отмечалось выше, для участков 1, 3, 5, 6 удалось построить графики временных серий только по данным S-1 начиная с 2015 г. (см. рис. 4в). До 2012 г. эта территория характеризовалась слабым отражением радарного сигнала, а на временной интервал 2012–2015 гг. радарные снимки территории отсутствуют.

Максимальное устойчивое проседание за период 2015–2019 гг. отмечено на участке 1 (ул. Журналистов) — около 250 мм. Этот максимум зафиксирован в непосредственной близости от стройплощадки между ул. Журналистов и ул. Кленовая, где в больших объёмах

проводится экскавация грунта. Снимок дренажного канала (см. *рис. 5в*), в который упирается ул. Журналистов, иллюстрирует высокую обводнённость на этом участке. Кроме того, здесь отмечается несовпадение значений вертикального смещения по данным с восходящего и нисходящего треков. Вероятной причиной этого могут быть подвижки водонасыщенных грунтов в сторону котлована, т.е. появление значимой горизонтальной компоненты смещений.

Участки 3 и 5 (ул. Триумфальная) характеризуются достаточно равномерным проседанием с величинами соответственно около 180 и 160 мм за четыре года (вертикальные скорости смещений — порядка 45 и 40 мм/год соответственно). На участке 6 наблюдается выполаживание кривой вертикальных смещений начиная с 2017 г., т.е. уменьшение скорости проседания приблизительно с 40 до 20 мм/год.

Анализируя карты средних скоростей вертикальных смещений (см. *рис. 3в, г*), можно заключить, что области проседания в период 2017–2019 гг. занимают меньшие площади, чем в 2015–2017 гг. Поскольку проседание непосредственно связано с обводнённостью грунтов, мы проанализировали выпадение осадков в период 2015–2019 гг. по данным метеостанции Сочи (*рис. 6*).

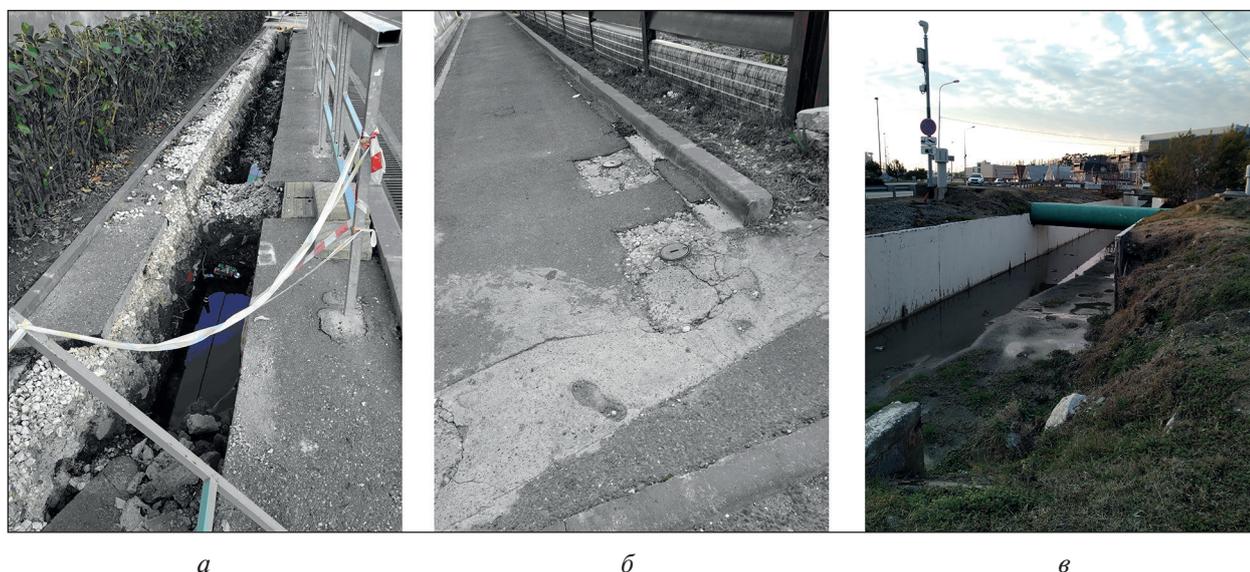


Рис. 5. Снимки дренажной канавы (*а*) и участков ремонта дорожного полотна (*б*) с выступающими над поверхностью земли канализационными люками на ул. Кувшинок, пос. Мирный; снимок дренажного канала вблизи ул. Журналистов (*в*)

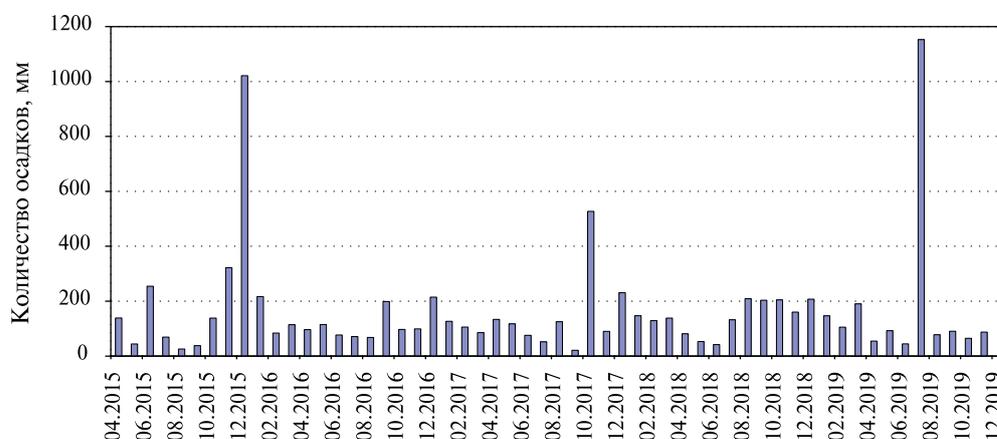


Рис. 6. Среднемесячное количество осадков за период 2015–2019 гг. по данным метеостанции Сочи (http://meteocenter.net/37171_fact.htm)

Из графика на *рис. 6* следует, что общее количество осадков за периоды с апреля 2015 г. по ноябрь 2017 г. и с ноября 2017 г. по декабрь 2019 г. различается незначительно. Следовательно, уменьшение площадей, где наблюдаются просадки, за период 2017–2019 гг. по сравнению с периодом 2015–2017 гг., скорее всего, не связано с величиной выпавших осадков. При этом отмеченное уменьшение площадей проседающих территорий в 2017–2019 гг. по сравнению с 2015–2017 гг. не сопровождается уменьшением проседания на всех участках, для которых построены графики временных серий, кроме участка 6 (см. *рис. 4*). Возможным объяснением этого факта может быть снижение со временем общей обводненности исследуемой области. В то же время вертикальные деформации на отдельных участках, где зафиксированы более высокие по сравнению с окружающими территориями значения просадок, очевидно, обусловлены локальными причинами (экскавация грунта, работа дренажных систем и пр.).

Обработка серий снимков с помощью двух различных алгоритмов: SBAS ENVI SARscape и PS StaMPS/MTI, изменение количества снимков в сериях и временных интервалов, к которым относятся эти серии, а также анализ снимков с восходящего и нисходящего треков — всё это позволило произвести кросс-валидацию полученных результатов. В качестве примера на *рис. 7* показан фрагмент наложения двух карт средних скоростей смещений в направлении LOS, полученных в результате обработки серий снимков со спутника S-1A за период 2017–2019 гг. (67 снимков SBAS ENVI SARscape) и спутников S-1A/B за 2018–2019 гг. (33 снимка PS StaMPS/MTI).

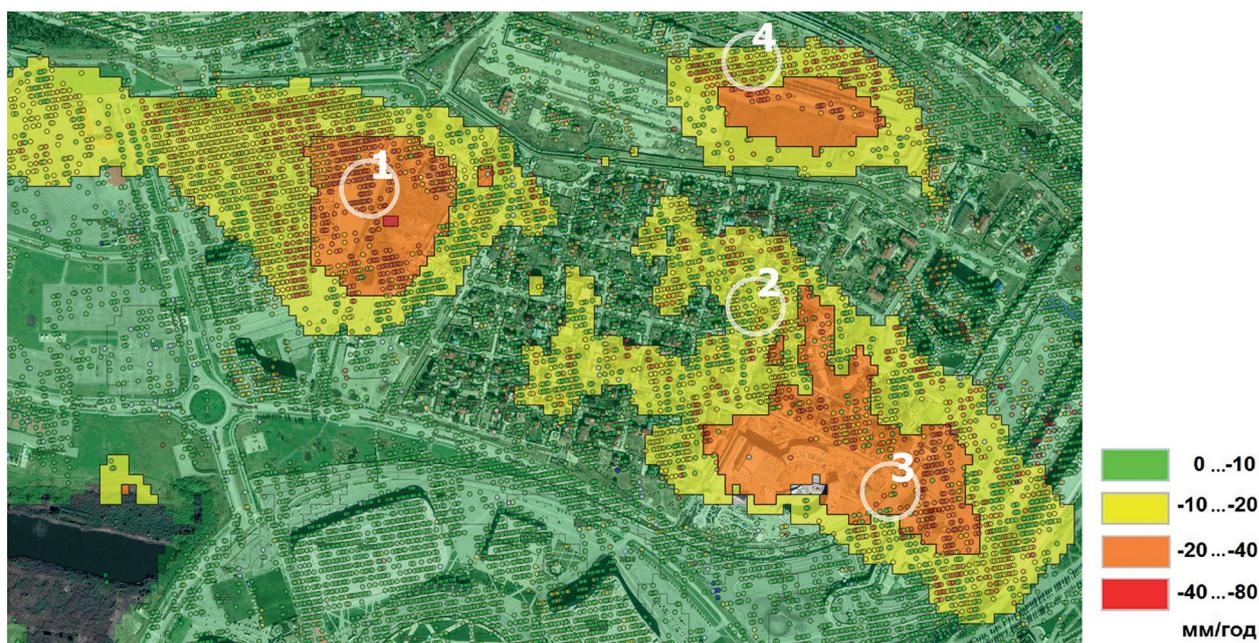


Рис. 7. Фрагмент наложения карт средней скорости вертикальных смещений в направлении LOS по 67 снимкам S-1A за период 04.10.2017–17.12.2019 (SBAS ENVI SARscape) (сплошной цвет) и по 33 снимкам со спутников S-1A/B за период 05.10.2018–27.04.2019 (PS StaMPS/MTI) (точки)

Важно, что основные участки проседания в центральной части исследуемой области (1, 2, 3, 4) хорошо видны на обеих картах *рис. 7*, полученных с помощью двух вышеуказанных технологий, хотя конфигурации этих областей совпадают неточно. Отчасти эти несовпадения обусловлены разными временными интервалами, к которым относятся карты. Но кроме того, устойчивые отражатели PS (*англ.* Persistent Scatterer), идентифицированные методом StaMPS/MTI, в этом случае привязаны к строительным объектам, а метод SBAS ENVI SARscape позволяет также получать информацию и по распределённым отражателям на природных ландшафтах, где PS не идентифицируются. В данной ситуации использование

технологии PS StaMPS/MTI позволяет получать более детальную информацию о проседании сооружений, а SBAS ENVI SARscape — более полную пространственную информацию о проседании территорий. Принципиальное совпадение двух вышеописанных результатов является свидетельством их достоверности.

Полученные нами результаты хорошо согласуются с наземными данными. Так, например, в районе строящегося Главного медиацентра Олимпиады (Сочи, ул. Журналистов), где по РСА-интерферометрии отмечена зона максимального проседания, по материалам, приведённым в работах (Гудкова, 2016; Потапов и др., 2012), отмечалось формирование просадок насыпных грунтов по автодорогам и планировочным насыпям. Все выделенные нами по спутниковым данным зоны просадок находятся в центральной части Имеретинской низменности, где согласно карте инженерно-геологического районирования (Телков и др., 2012) расположены лагунные отложения со значительной долей слабых грунтов.

Выводы

Полученные результаты показывают, что методы РСА-интерферометрии позволяют с высокой степенью детальности анализировать динамику проседания территории Имеретинской низменности за последние 12 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 зданий и сооружений. Полученные карты смещений хорошо согласуются с наземными данными. Идентифицированные просадки являются существенными, поэтому в области олимпийских объектов целесообразно выполнять регулярный мониторинг смещений, в том числе и методами спутниковой РСА-интерферометрии. Этот метод не требует больших финансовых затрат, его результаты могут быть проинтерпретированы вместе с данными наземной и спутниковой геодезии.

Применены две технологии обработки РСА-снимков: PS StaMPS/MTI и SBAS ENVI SARscape. Показано, что для района исследований технология PS StaMPS/MTI даёт более детальную информацию о проседании сооружений, а SBAS ENVI SARscape — более полные пространственные данные о проседании незастроенных ландшафтов. Принципиальная согласованность результатов по двум различным технологиям подтверждает их достоверность.

Литература

1. Гудкова Н. К. Мониторинг геологической среды олимпийских объектов в Сочи // Системы контроля окружающей среды. 2016. Т. 3. № 23. С. 130–133.
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 // Геофиз. исслед. 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. Российской акад. наук. Сер. «Физика Земли». 2014. № 4. С. 120–130.
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.

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.
8. 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.
9. 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.
10. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanathéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 115. P. 78–89.
11. 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. Art. L23611. 5 p.
12. 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. Iss. B7. Art. B07407. 21 p. DOI: 10.1029/2006JB004763.
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 // Proceeding Technology. 2014. V. 16. P. 404–413.
14. 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. 149. 16 p. URL: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00149>.
15. 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>.

Subsidence monitoring in the Imereti lowland (the Big Sochi region) using multifrequency InSAR data for 2007–2019

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*

The results of InSAR based estimation of subsidence of the surface and infrastructure of Olympic Park in the Imereti lowland are presented. We incorporated multifrequency SAR images covering the 12-year period from 2007 to 2019: ALOS-1 (18 acquisitions for 2007–2010), Envisat (13 acquisitions, 2011–2012), Sentinel-1 (more than 300 acquisitions, 2015–2019). Using the SAR data we identified 6 subsidence areas in the Imereti lowland. For the past two years maximum values of total subsidence have reached 150 mm. To process the images, we used ENVI SARscape and PS Stamps/MTI software. For all the datasets, we present maps of surface vertical displacements. Vertical movements were estimated as vertical projection of the line-of-sight displacements assuming horizontal displacements being negligibly small. That assumption was verified by comparing results from ascending and descending tracks. For each of the six subsidence areas, time-series of vertical displacements were compiled using all datasets available. The time-series graphs made it possible to identify the periods of stability and changing in time subsidence, correlate them with construction works being under way. The InSAR based displacement maps are in good agreement with field data. The identified subsidence is quite strong, thus regular monitoring of displacements of surface and infrastructure in the Olympic Park area incorporating InSAR methods is worthwhile.

Keywords: SAR, InSAR, satellite monitoring, ground subsidence, Sentinel-1, ALOS-1, ENVISAT, Imereti lowland, Big Sochi

Accepted: 29.07.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113

References

1. Gudkova N. K., Monitoring geologicheskoi sredy olimpiiskikh ob"ektov v Sochi (Monitoring of geological environment of Olympic infrastructure), *Sistemy kontrolya okruzhayushchei sredy*, 2016, Vol. 3, No. 23, pp. 130–133.
2. Dmitriev P. N., Golubev V. I., Isaev Yu. S., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolyaninova 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), *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., Smolianinova 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., Smolianinova 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. Potapov A. D., Leibman M. E., Lavrusevich A. A., Chernyshev S. N., Markova I. M., Bakalov A. Yu., Krashenninikov V. S., Monitoring ob"ektov inzhenernoi zashchity na Imeretinskoj nizmennosti (Monitoring of engineering protection in the Imereti lowland), *Geoekologiya, inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya*, 2012, No. 5, pp. 406–413.
6. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Dmitriev P. N., Mikhailov V. O., O vozmozhnosti primeneniya RSA-interferometrii s ispol'zovaniem snimkov so sputnikov Sentinel-1 pri izuchenii opolznevoi aktivnosti v raione gornogo klastera Bol'shogo Sochi (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.
7. Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Primenenie RSA-interferometrii snimkov so sputnikov Sentinel-1 pri izuchenii oblastei aktivnykh deformatsii poverkhnosti v pribrezhnom raione Bol'shogo Sochi (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.
8. Telkov F. S., Naumov M. S., Isakov V. A., Faktory inzhenerno-geologicheskogo riska na territorii Imeretinskoj nizmennosti (Engineering geological risk factors in the Imereti lowland), *Problemy snizheniya prirodnykh opasnostei i riskov* (Problems of Natural Risk and Danger Prevention), Proc. Intern. Scientific-Practical Conf. "Georisk-2012", Moscow, 2012, Vol. 2, pp. 324–330.
9. 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.
10. 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.
11. 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, Art. L23611, 5 p., DOI: 10.1029/2004GL021737.
12. 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, Issue B7, Art. B07407, 21 p., DOI: 10.1029/2006JB004763.
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, *Proceeding Technology*, 2014, Vol. 16, pp. 404–413, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.

14. 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. 149, 16 p., available at: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00149>.
15. 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>.