

Мониторинг оползневой активности склонов в районе Большого Сочи за период 2015–2024 гг. по данным РСА-интерферометрии

Е. И. Смольянинова, В. О. Михайлов

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

Высокая оползневая опасность в интенсивно застраиваемых прибрежных районах Большого Сочи обуславливает необходимость постоянного мониторинга оползневой активности склонов. Настоящая работа — продолжение исследований по применению метода спутниковой радарной интерферометрии (InSAR) для изучения оползневых процессов в этом регионе. Представлена обновлённая интерактивная карта деформаций поверхности для Центрального и Адлерского района Большого Сочи, построенная на базе интерферометрической обработки радарных снимков со спутника Sentinel-1A с восходящего и нисходящего трека за период 2015–2024 гг. Карта размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/1181/display?panel=info>. Обработка снимков проводилась методом SBAS (*англ.* Small Baseline Subset) в пакете ENVI SARscape. По результатам интерферометрической обработки снимков на карте в виде слоёв представлены средние значения скорости смещений в направлении визирования спутника V_{los} и вдоль склона V_{sd} для двух периодов: 2015–2021 и 2021–2024 гг. Для обоих периодов на карте выделены области активных деформаций (ОАД), где значения V_{los} превышают заданный порог в 10 мм/год. При расчётах за 2015–2021 гг. было идентифицировано 58 наиболее значительных ОАД. При расчётах за 2021–2024 гг. зафиксировано 27 новых ОАД, а в 15 ОАД из 58, выявленных за предыдущий период, наблюдался рост активности. Возможности применения InSAR для мониторинга оползневой активности в данном регионе показаны на примере оползневого склона в окрестности построенного в 2020 г. коттеджного посёлка (КП) Горная Олимпия-2. Сравнение представленных на карте результатов расчётов для двух периодов: 2015–2021 и 2021–2024 гг. — показывает увеличение со временем площади ОАД по данным с восходящего трека 43A, а по данным с нисходящего трека 123D наблюдается также увеличение абсолютных значений средней скорости — V_{los} меняется с $-10...-30$ до $-30...-50$ мм/год. Анализ временных серий смещений на различных участках в пределах КП и в непосредственной близости от его границ совместно с графиками выпадения осадков показал, что обильные осенне-зимние осадки 2021–2022 гг. инициировали активизацию оползневого процесса на этом участке в феврале 2022 г. Максимальная скорость до 25 мм/мес зафиксирована у южной границы КП. Эта опасная ситуация требует постоянного мониторинга.

Ключевые слова: радары с синтезированной апертурой, спутниковая интерферометрия, спутниковый мониторинг, оползни, интерактивная карта, Sentinel-1A, Большой Сочи, Адлер

Одобрена к печати: 03.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78

Введение

Высокая оползневая опасность в интенсивно застраиваемых прибрежных районах Большого Сочи обуславливает необходимость постоянного мониторинга оползневой активности склонов. Мониторинг оползневой активности на такой обширной территории требует привлечения современных методов. Методы интерферометрической обработки данных спутниковых радаров с синтезированной апертурой (РСА-интерферометрии, *англ.* Interferometric Synthetic Aperture Radar — InSAR) успешно используются при изучении оползневых процессов в различных районах мира (см., например, обзоры (Mondini et al., 2021; Moretto et al., 2021; Solari et al., 2020)). Прибрежная часть Большого Сочи обладает очень благоприятными условиями для применения InSAR: невысокий (до 200–300 м) и достаточно пологий рельеф (угол падения в основном не превышает 20–30°), стабильное отражение радарного сигнала, благодаря плотной застройке, и преобладание медленных, порядка нескольких сантиметров в год,

смещений, которые хорошо регистрируются этим методом. Такие смещения обычно не приводят к катастрофическим последствиям, однако причиняют экономический ущерб в результате деформации дорог, зданий и сооружений, а изменение динамики смещений часто способствует и значительным подвижкам на оползневых склонах. В последние годы в районе Большого Сочи было построено большое количество коттеджных посёлков (КП) на пустующих землях, подверженных оползневому процессам. Такие участки требуют постоянного мониторинга. Пример анализа динамики оползневого склона по данным InSAR приведён в работе (Смольянинова, Михайлов, 2024) для территории КП Горная Поляна в селе Сергей-Поле, где в октябре 2021 г. сошёл мощный оползень.

Сотрудники Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ РАН) занимаются вопросами изучения оползневых процессов в районе Большого Сочи с помощью InSAR с 2012 г. (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2014; Смольянинова, Михайлов, 2024; Смольянинова и др., 2019, 2021, 2022; Kiseleva et al., 2014). С 2015 г. ведётся регулярная (с интервалом 6–12 дней) съёмка этой территории со спутников Sentinel-1, а тот факт, что снимки почти в реальном масштабе времени свободно распространяются через интернет, позволяет осуществлять практически непрерывный мониторинг. В работах (Смольянинова и др., 2019, 2021) было показано, что в условиях прибрежной части Большого Сочи карты поверхностных деформаций по РСА-интерферометрии и карты оползневых проявлений и оползневой опасности, построенные на базе полевых наблюдений, дополняют друг друга и их целесообразно использовать совместно. В публикациях (Смольянинова, Михайлов, 2024; Смольянинова и др., 2022) были представлены интерактивные карты деформаций поверхности, построенные по снимкам со спутника Sentinel-1A с восходящего (43A) и нисходящего (123D) треков за период с апреля 2015 по апрель 2021 г. (43A) и апрель 2023 г. (123D). Обновление карты с учётом постоянно удлиняющейся серии снимков осуществляется каждые полгода.

В настоящей работе мы представляем очередное обновление карты деформаций для Центрального и Адлерского района Большого Сочи, построенной по снимкам с восходящей и нисходящей орбиты вплоть до апреля 2024 г. Расчёты проводились независимо для двух периодов: апрель 2015–октябрь 2021 г. и ноябрь 2021–апрель 2024 г., что позволило провести оценку изменений оползневой активности. Приводится пример использования карты для анализа динамики оползневой активности в окрестности КП Горная Олимпия-2.

Последняя версия карты размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/1181/display?panel=info>.

Район исследований, использованные данные и их обработка

При построении представленной в работе обновлённой карты деформаций земной поверхности для района Большого Сочи были использованы радарные снимки со спутника Sentinel-1A: 254 снимка с трека 43A и 236 снимков с трека 123D — за период апрель 2015–апрель 2024 г. Для того чтобы провести расчёты только в густонаселённой прибрежной полосе, а также для экономии машинных ресурсов при подборе параметров вычислений, как и ранее, из снимков было вырезано по два участка с каждого трека (Центральный и Адлерский район). На *рис. 1* (см. с. 71) показаны расчётные области и положение КП Горная Олимпия-2. Для каждой области вычисления выполнены для двух периодов: апрель 2015–октябрь 2021 г. и ноябрь 2021–апрель 2024 г. Это упрощает периодическое обновление карты, так как очередные расчёты проводятся начиная с 2021 г. Сравнение результатов, полученных за эти два периода, позволяет анализировать динамику оползневых процессов на конкретных участках.

Интерферометрическая обработка снимков и расчёты полей смещений проводились по методу SBAS (*англ.* Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002), реализованному в пакете ENVI SARscape v. 5.3. Описание методики расчётов приведено в работах (Смольянинова и др., 2019, 2021).

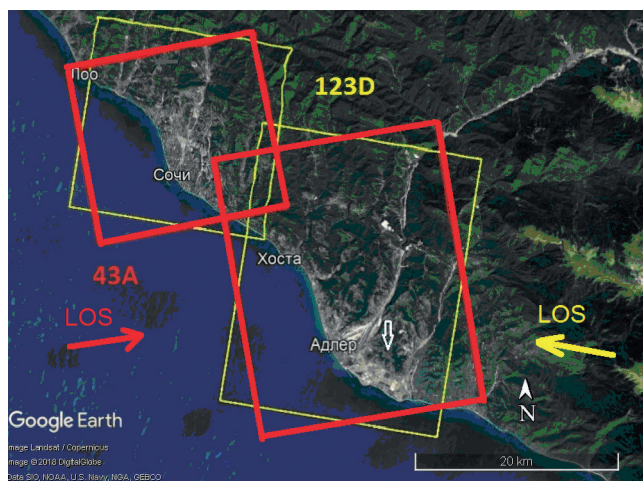


Рис. 1. Район исследований и расчётные области, покрываемые радарными снимками спутника Sentinel-1A с восходящего (43A) и нисходящего (123D) трека. Местонахождение КП Горная Олимпиада-2 в Адлерском районе отмечено белой стрелкой. Направление визирования спутника (LOS) показано стрелками: жёлтой — с нисходящего трека, красной — с восходящего

Построение карты осуществлялось с использованием бесплатной ознакомительной версии отечественного программного обеспечения NextGIS QGIS, которое включает технологию быстрого управления данными на сервере NextGIS Web (с помощью модуля NextGIS Connect, <https://nextgis.ru/nextgis-web/>).

Для построения графиков временных серий выбирались точки, где значения смещений получены за оба периода: 2015–2021 и 2021–2024 гг. Графики временных серий смещений строятся за весь период наблюдений, начиная с 2015 г. Смещения за период ноябрь 2021–апрель 2024 г. суммируются со смещениями в конечной точке временной серии за период апрель 2015–октябрь 2021 г.

При построении графиков выпадения осадков использовались архивные данные с сайта «Расписание погоды» (<https://rp5.ru>) для метеостанции 37171 — аэропорт Сочи. Для того чтобы проанализировать связь между количеством осадков и активизацией оползневых процессов на отдельных участках оползневого склона, архивные данные о выпавших осадках были просуммированы за 1, 3, 5, 15 и 30 дней.

Результаты исследований

В настоящей работе мы представляем обновлённую интерактивную карту деформаций поверхности для Центрального и Адлерского района Большого Сочи, которая размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/1181/display?panel=info>.

Технология построения карты описана в публикации (Смольянинова и др., 2022). По результатам интерферометрической обработки снимков на карте в виде слоёв представлены средние значения скорости смещений в направлении визирования спутника V_{los} (англ. line of sight) и вдоль склона V_{sd} (англ. slope down) для двух периодов: 2015–2021 и 2021–2024 гг. Для обоих периодов на карте выделены области активных деформаций (ОАД), где значения V_{los} превышают заданный порог в 10 мм/год. При расчётах за период 2015–2021 гг. было идентифицировано 58 наиболее значительных ОАД. При расчётах за период 2021–2024 гг. найдено 27 новых ОАД, а в 15 ОАД из 58, выявленных за предыдущий период, наблюдался рост активности. В 11 ОАД зарегистрировать изменения активности оказалось затруднительным из-за частичной или полной потери когерентности радиолокационных сигналов в длинной серии снимков вследствие существенных изменений ландшафта. Вышеперечисленные группы ОАД отмечены на карте кругами различных цветов, что позволяет анализировать изменения активности конкретных участков за период наблюдений. На представленной

карте имеются также слои средней скорости смещений вниз по склону V_{sd} . Значение смещения вниз по склону V_{sd} вычисляется, исходя из геометрии съёмки и цифровой модели рельефа, по которой определяются экспозиции склонов и углы наклона. Скорость смещений вниз по склону V_{sd} рассчитывалась с использованием модуля пакета ENVI SARscape как проекция скорости в направлении визирования спутника V_{los} на направление максимальной крутизны склона. Сложности оценки значений V_{sd} описаны в работе (Смольянинова, Михайлов, 2024). На карте показаны только значения скорости вниз по склону V_{sd} , которые мы считаем достаточно достоверными. Основываясь на работе (Notti et al., 2014), не рассматриваются участки, где значения V_{sd} превышают значения V_{los} более чем в пять раз, и, кроме того, исключены положительные значения V_{sd} , так как смещения оползневых масс вверх по склону наблюдаются крайне редко. Спутниковые данные дополнены информацией об оползневых проявлениях по наземным данным исследования (Вожик, Шамурзаева, 2018) и данным ФГБУ «Гидроспецгеология» (http://geomonitoring.ru/inform_product.html), представленной в виде отдельных подключаемых слоёв.

Для примера рассмотрим использование карты для анализа динамики оползневой активности в окрестности КП Горная Олимпия-2. На рис. 2 показана средняя скорость смещений в направлении визирования спутника V_{los} (в мм/год). Смещения в направлении спутника считаются положительными, а от спутника — отрицательными.

Сравнение результатов расчётов для двух периодов: 2015–2021 и 2021–2024 гг. — показывает увеличение со временем площади ОАД по данным с восходящего трека 43А (см. рис. 2а, б), а по данным с нисходящего трека 123D (см. рис. 2в, г) наблюдается также увеличение абсолютных значений средней скорости V_{los} с $-10...-30$ до $-30...-50$ мм/год.

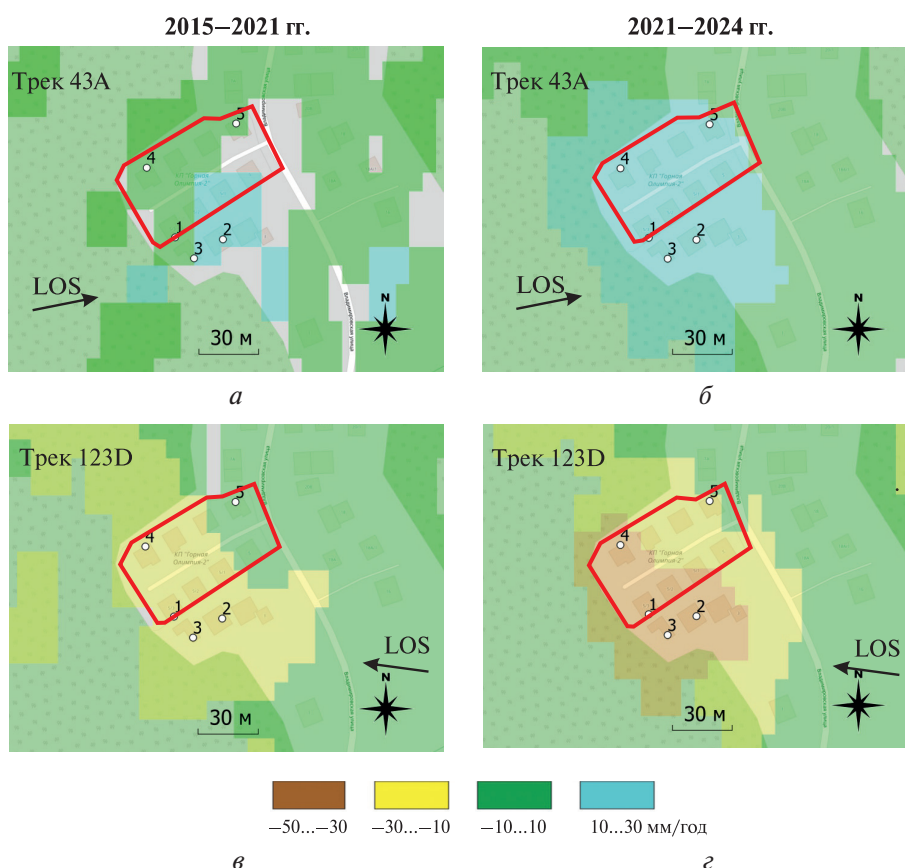


Рис. 2. Фрагмент карты оползневой активности в окрестности КП Горная Олимпия-2. Представлен слой средней скорости смещений в направлении визирования спутника V_{los} (в мм/год). Дополнительно кружками с цифрами показаны точки, для которых построены графики временных серий смещений (рис. 3), и красный контур — границы КП. Цветовые оттенки слоёв на карте и в легенде несколько отличаются, так как слои на карте полупрозрачные

На рис. 3 представлены графики временных серий смещений в точках, отмеченных на рис. 2.

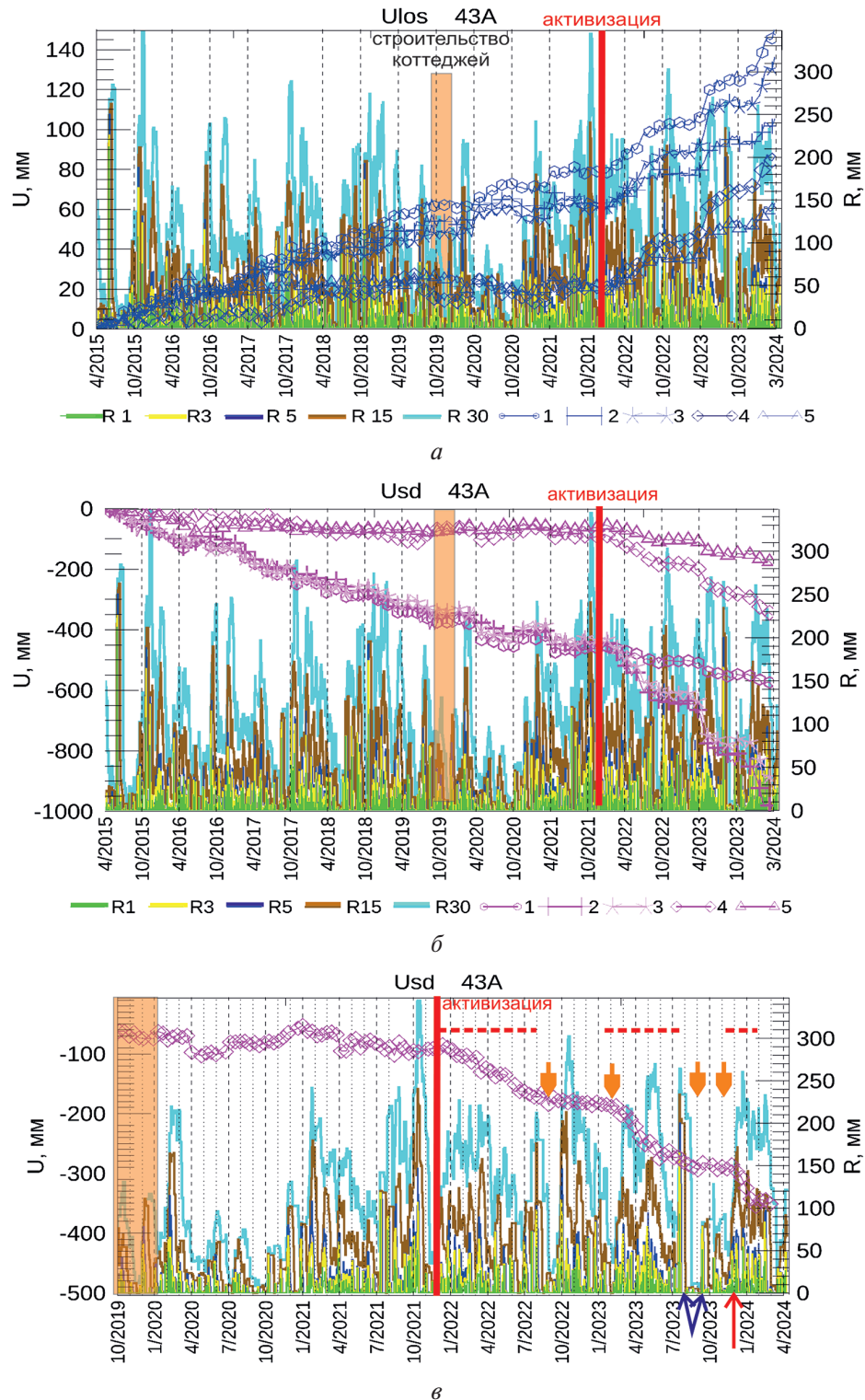


Рис. 3. Графики временных серий смещений U_{los} (а) и U_{sd} (б) (трек 43А) и выпадения осадков R , просуммированных за 1, 3, 5, 15 и 30 дней (данные об осадках взяты из архива сайта <http://rp5.ru>, описание см. в тексте). Увеличенный фрагмент рис. 3б с кривой U_{sd} для точки № 4 (в): красный пунктир — периоды подвижек, оранжевые стрелки — периоды с малым выпадением осадков, фиолетовые стрелки — моменты кратковременных обильных выпадений осадков, красная стрелка — начало продолжительного периода выпадения осадков. На кривых смещений на рис. 3а и б показана каждая четвёртая точка с данными, а на рис. 3в представлены все точки

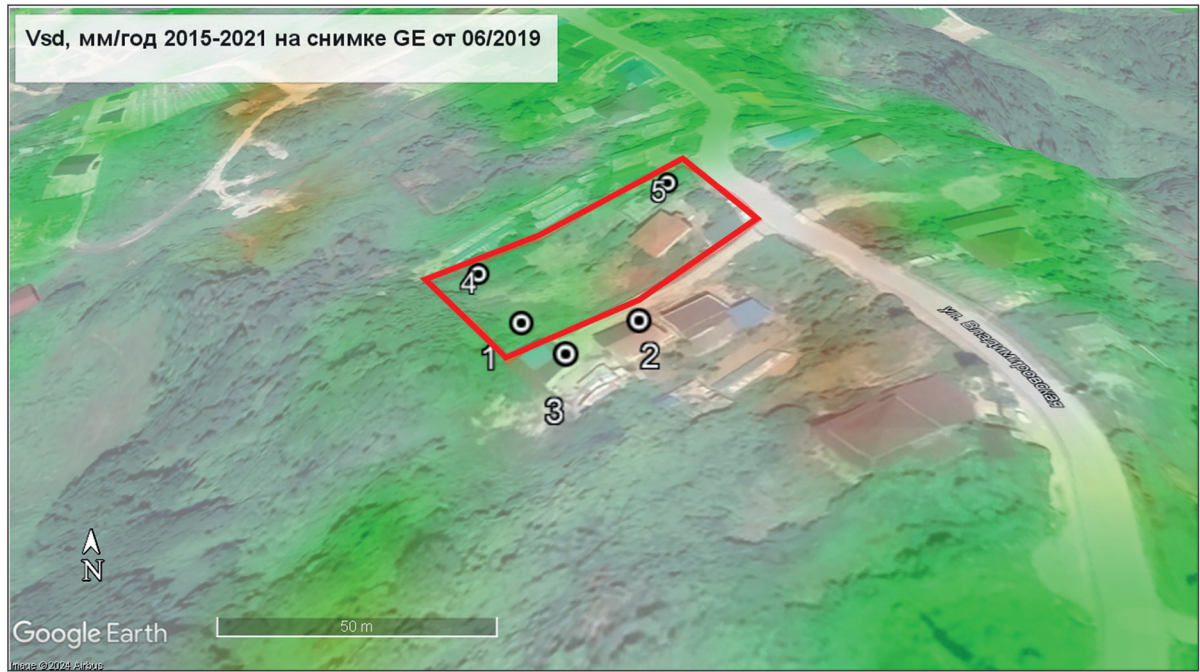
По кривым смещений на *рис. 3* чётко выделяется начало активизации оползневого процесса на территории КП и в его окрестности в феврале 2022 г.

Обсуждение результатов

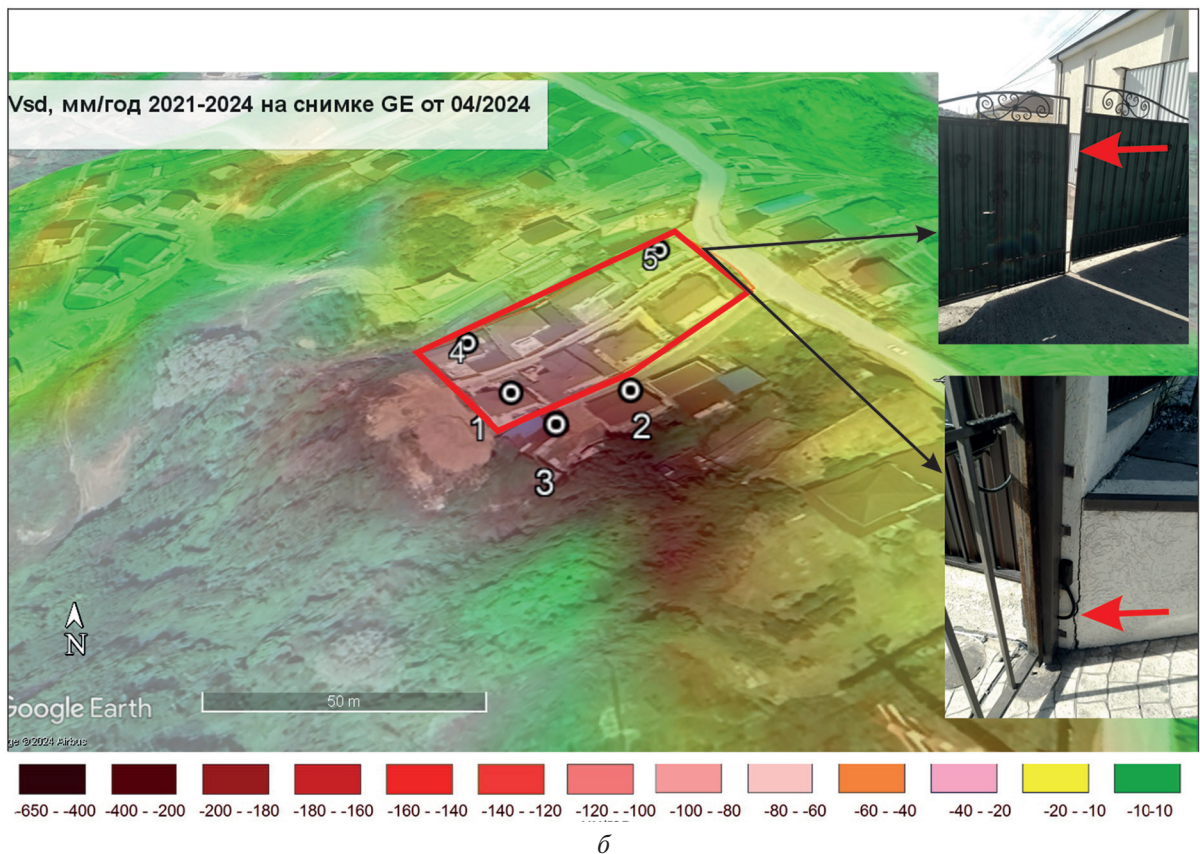
На *рис. 4* (см. с. 75) фрагменты карты деформаций в районе КП Горная Олимпия-2 с показанными слоями средней скорости смещений вдоль склона V_{sd} представлены на снимках GE (*англ.* Google Earth), соответствующих периодам, для которых были проведены расчёты. Судя по снимкам Google Earth от июня 2019 г. и апреля 2020 г., строительство КП Горная Олимпия-2 началось осенью 2019 г. До этого момента территория не была застроена. В верхней части склона было одно здание (см. *рис. 4а*). В основном смещения на территории, где будет построен КП, были близки к нулю (V_{sd} — зелёный цвет), но к югу, там, где уже имелись строения, и частично на месте будущих коттеджей, скорость смещений вдоль склона V_{sd} составляла порядка 30–50 мм/год.

Северная часть КП до начала строительства и после него вплоть до декабря 2021 г. находилась в стабильном состоянии (точки № 4 и 5) (см. *рис. 3* и *4*). Смещения в южной части посёлка имели место и до начала строительства, в точках № 1, 2 и 3 регистрировались смещения со средней скоростью до 60 мм/год. После строительства КП, в результате чего появилась дополнительная нагрузка и нарушился естественный водосток по склону, и, вероятно, вследствие интенсивных осадков в феврале 2020 г. в точках № 1–4 произошла синхронная кратковременная подвижка с последующими сезонными колебаниями. После этого на протяжении летнего периода 2021 г. с малым количеством выпавших осадков ситуация была относительно стабильной. Последовавшие за этим обильные осенне-зимние осадки 2021–2022 гг. инициировали активизацию оползневого процесса по всей рассматриваемой области. Кривые V_{los} и V_{sd} во всех точках меняются синхронно. Графики имеют ступенчатый характер. Вслед за длительными и обильными осадками наблюдаются периоды активизации смещений длительностью в несколько месяцев, которые при уменьшении количества выпадающих осадков сменяются менее продолжительными периодами стабильности. Максимальная скорость до 25 мм/мес зафиксирована вне территории КП у южной его границы в точках № 2 и 3. На территории КП наиболее существенные смещения происходили в окрестности точки № 4, суммарно с начала 2022 г. они составили около 200 мм. В точках № 1 и 5 за тот же период смещения были менее значительными и не превышали 50 мм.

В результате совместного анализа графиков временных серий смещений и выпадения осадков R , просуммированных за 1, 3, 5, 15 и 30 дней (см. *рис. 3*) можно сделать вывод о непосредственной связи активности рассматриваемого оползневого склона с выпадением осадков. Эта зависимость стала особенно заметной после активизации оползневого склона в феврале 2022 г. Графики на *рис. 3* иллюстрируют известный факт возрастания оползневой активности в глинистых породах (широко представленных в рассматриваемом районе), когда после засушливого периода (оранжевые стрелки на *рис. 3в*) начинается длительный период выпадения осадков. В этом случае глинистые породы, трещиноватость которых увеличивается за время отсутствия осадков, особенно интенсивно впитывают влагу при начале дождей. На величину и продолжительность периода подвижек влияют не столько количество единовременно выпавших осадков, сколько длительность дождевого периода. Так, например, выпавшее за сутки в начале июля 2023 г. количество осадков, превышающее месячную норму (более 100 мм), а также половина месячной нормы осадков в начале сентября того же года (около 60 мм) (фиолетовые стрелки на *рис. 3в*) не привели к подвижкам, а за существенно меньшим суточным количеством осадков, но продолжавшихся с коротким перерывом до весны 2024 г. (красная стрелка на *рис. 3в*), последовали интенсивные смещения оползневого склона. Выпавшие единовременно обильные осадки, очевидно, просто стекают по склону, не успевая впитываться. Наиболее информативной для оценки количества и продолжительности выпадения осадков, влияющих на оползневую активность данного склона, является кривая выпадения осадков, просуммированная за 15 дней.



a



b

Рис. 4. Фрагменты карты в окрестности КП Горная Олимпия-2 на подложке Google Earth: а — от июня 2019 г. (до начала строительства КП); б — от апреля 2024 г. (современное состояние). Показаны полупрозрачные слои средней скорости смещений вдоль склона V_{sd} (в мм/год) по расчётам соответственно за 2015–2021 гг. (а) и 2021–2024 гг. (б). Кружками с цифрами обозначены точки, для которых построены графики временных серий смещений (см. рис. 3). Красный контур — границы КП. Фото справа сделаны 03.10.2024 у входа в КП (место съёмки показано чёрными стрелками). Красными стрелками на фото отмечены деформации построек, которые, вероятно, являются результатом оползневых смещений

Наличие смещений даже в верхней части КП, где по результатам расчётов они наименее интенсивные, подтверждено в ходе визуального обследования. На *рис. 4* представлены фотографии, сделанные в октябре 2024 г. Е. Смольяниновой у входа в КП. Трещины в стене и на тротуаре, а также подъём створки массивных ворот, вероятно, свидетельствуют о происходящих деформациях. К сожалению, обследовать территорию, где по спутниковым данным смещения существенно более интенсивные, не удалось из-за отсутствия допуска в КП.

Выводы

- В прибрежной части Большого Сочи применение спутниковой РСА-интерферометрии позволяет успешно осуществлять мониторинг оползневых процессов: выявлять области оползневой активности и следить за динамикой поведения оползневых масс.
- В Центральном и Адлерском районе Большого Сочи при расчётах за 2015–2021 гг. было идентифицировано 58 наиболее значительных областей активных деформаций. При расчётах за 2021–2024 гг. обнаружено 27 новых ОАД, а в 15 ОАД из 58, выявленных за предыдущий период, наблюдался рост активности (более высокая скорость деформаций и/или увеличение площади ОАД).
- Приведённый пример анализа результатов InSAR для КП Горная Олимпия-2 позволяет отметить перспективность этого метода при мониторинге оползневой активности в прибрежных районах с плотной застройкой, в частности, вновь построенных коттеджных посёлках, где применение наземных методов затруднено. На территории КП Горная Олимпия-2 зафиксирован опасный рост оползневой активности, требующий постоянного мониторинга.
- Обладая целым рядом преимуществ по сравнению с наземными методами, метод InSAR с использованием снимков со спутников Sentinel-1 является низко затратным, позволяющим существенно уменьшить объёмы наземных исследований оползневых процессов.

Авторы благодарят Европейское космическое агентство за предоставленные снимки спутника Sentinel-1A.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. *Вожик А. А., Шамурзаева Д. А.* Оперативное региональное прогнозирование активности оползневых процессов на примере Сочинского полигона // *Геоинформатика*. 2018. № 4. С. 59–70.
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., Смольянинова Е. И. и др.* Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // *Физика Земли*. 2014. № 4. С. 120–130. DOI: 10.7868/S0002333714040103.
4. *Смольянинова Е. И., Михайлов В. О.* Анализ смещений оползневых склонов в районе Большого Сочи по данным РСА-интерферометрии на примере оползня в селе Сергей-Поле (коттеджный посёлок Горная Поляна) // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2024. Т. 21. № 3. С. 73–83. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-73-83.
5. *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.
6. *Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н.* Выявление и мониторинг областей активных деформаций в Адлерском районе Большого Сочи путём анализа серий разночастотных спутнико-

- вых радарных снимков за 2007–2020 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 55–65. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.
7. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии за 2015–2021 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 4. С. 141–149. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
 8. 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. DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
 9. Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E. et al. 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.
 10. Mondini A. C., Guzzetti F., Chang K.-T. et al. Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future // Earth-Science Reviews. 2021. V. 216. Article 103574. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574>.
 11. Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P. The role of satellite InSAR for landslide forecasting: Limitations and openings // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 18. Article 3735. 31 p. <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.
 12. Notti D., Herrera G., Bianchini S. et al. A methodology for improving landslide PSI data analysis // Intern. J. Remote Sensing. 2014. V. 35. No. 6. P. 2186–2214. DOI: 10.1080/01431161.2014.889864.
 13. Solari L., Del Soldato M., Raspini F. et al. Review of satellite interferometry for landslide detection in Italy // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 8. Article 1351. 29 p. <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.

Monitoring of landslide activity in the Big Sochi region using InSAR for the period 2015–2024

E. I. Smolyaninova, V. O. Mikhailov

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

The high landslide hazard in the intensively developed coastal areas of the Big Sochi necessitates constant monitoring of landslide activity of slopes. This work is a continuation of research on the application of the satellite radar interferometry method (InSAR) to study landslide processes in this region. The paper presents an updated interactive map of surface deformations for the Central and Adler Districts of Big Sochi based on interferometric processing of radar images from the Sentinel-1A satellite from ascending and descending tracks for the period 2015–2024. The map is available on the Internet at <https://adler.nextgis.com/resource/1181/display?panel=info>. The images were processed using the SBAS (Small Baseline Subset) ENVI SARscape software. Derived from the results of the interferometric processing, the average values of displacement rates in the line of sight direction (V_{los}) and along the slope (V_{sd}) are presented on the map as layers for the two periods: 2015–2021 and 2021–2024. For both periods, active deformations areas (ADA) where V_{los} exceeds the specified threshold of 10 mm/year are highlighted on the map. For 2015–2021, 58 most significant ADAs are identified. For 2021–2024, 27 newly appeared ADAs are recorded, and 15 ADAs of the 58 identified for the previous period show an increase in activity. The possibility to use InSAR to monitor landslide activity in this region is shown by the case study of a landslide slope in the vicinity of the Gornaya Olimpiya 2 cottage settlement built in 2020. Comparison of the results presented on the map for 2015–2021 and 2021–2024 shows an increase in size of the ADA area over time, according to data from the ascending track 43A, while according to data from the descending track 123D, there is also an increase in absolute displacement rates: V_{los} changes from $-10\dots-30$ to $-30\dots-50$ mm/year. Joint analysis of the time series of displacements at various locations in the settlement and immediate vicinity of its borders, together with precipitation graphs shows that heavy autumn-winter precipitation in 2021–2022 initiated activation of the landslide in this area in February 2022. Maximum displacement rates up to 25 mm/month are recorded at the southern border of the settlement. This dangerous situation requires continuous monitoring.

Keywords: SAR, InSAR, satellite monitoring, landslides, interactive map, Sentinel-1A, Big Sochi, Adler

Accepted: 03.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78

References

1. Vozhik A. A., Shamurzaeva D. A., Operative regional prediction activity of landslide process on the example of Sochi polygon, *Geoinformatika*, 2018, No. 4, pp. 59–70 (in Russian).
2. 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 the case of the landslide monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 130–142 (in Russian).
3. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smolyaninova E. I. et al., Some problems of landslide monitoring using satellite radar with different wavelengths: case study of two landslides in the region of Greater Sochi, *Fizika Zemli*, 2014, No. 4, pp. 120–130 (in Russian), DOI: 10.7868/S0002333714040103.
4. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Analysis of displacements of landslides in the Big Sochi region based on InSAR data: Case study of Sergei Pol'e (Gornaya Polyana settlement), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 73–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-73-83.
5. Smolyaninova 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, V. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
6. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., 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, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 55–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.
7. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., Interactive map of active landslides and subsiding areas for the Central and Adler regions of the Big Sochi based on InSAR data for the period 2015–2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
8. 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, pp. 2375–2383, DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
9. Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E. et al., PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus, *Procedia Technology*, 2014, V. 16, pp. 404–413, DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
10. Mondini A. C., Guzzetti F., Chang K.-T. et al., Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future, *Earth-Science Reviews*, 2021, V. 216, 103574, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574>.
11. Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P., The role of satellite In-SAR for landslide forecasting: Limitations and openings, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 18, Article 3735, 31 p., <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.
12. Notti D., Herrera G., Bianchini S. et al., A methodology for improving landslide PSI data analysis, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, V. 35, No. 6, pp. 2186–2214, DOI: 10.1080/01431161.2014.889864.
13. Solari L., Del Soldato M., Raspini F. et al., Review of satellite interferometry for landslide detection in Italy, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 8, Article 1351, 29 p., <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.