

Об интерпретации результатов РСА-интерферометрии при изучении оползневой активности в прибрежном районе Большого Сочи по снимкам спутника Sentinel-1 за 2015–2025 гг.

Е. И. Смольянинова, В. О. Михайлов

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

Район Большого Сочи относится к территориям с высокой оползневой опасностью. Рост антропогенной нагрузки в этом регионе предъявляет всё более высокие требования к мониторингу оползневой активности. Настоящая работа является продолжением 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 районов Большого Сочи, построенная на базе интерферометрической обработки радарных снимков со спутника Sentinel-1A с восходящего 43A (295 снимков) и нисходящего 123D (278 снимков) трека за период 2015–2025 гг. Карта размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/1214/display?panel=info>. Обработка снимков проводилась методом SBAS (*англ.* Small Baseline Subset) в пакете ENVI SARscape v. 5.3. По результатам интерферометрической обработки снимков на карте представлены в виде слоёв средние за год значения скорости смещений в направлении визирования спутника и вдоль склона для двух периодов: 2015–2021 и 2021–2025 гг. В дополнение к этому для оценки текущей активности оползневых процессов произведён расчёт смещений за последние полтора года. Результаты отображены на карте в виде слоёв с выделенными областями, абсолютные значения смещений в которых превышают за этот период 50 мм — величину, принятую за пороговый уровень опасности. За период 2021–2025 гг. было выявлено и отмечено на карте 36 потенциально опасных областей активных деформаций, из которых 11 предполагаются наиболее опасными. Для зафиксированных потенциально опасных областей представлены графики временных серий совместно с данными о выпадении осадков, которые позволяют выделять периоды относительного покоя и активизации. Показано, что наиболее опасным является период интенсивного выпадения осадков после засушливого лета. Подробно обсуждаются особенности интерпретации результатов РСА-интерферометрии в сравнении с наземными данными.

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

Одобрена к печати: 02.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-171-181

Введение

Район Большого Сочи относится к территориям с высокой оползневой опасностью. Рост антропогенной нагрузки в этом регионе предъявляет всё более высокие требования к мониторингу оползневой активности. Спутниковая РСА-интерферометрия InSAR (*англ.* Interferometric Synthetic Aperture Radar) — метод дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), который успешно применяется в мировой практике при изучении оползневой активности склонов (см., например, обзоры (Crosetto et al., 2016; Mondini et al., 2021; Moretto et al., 2021; Solari et al., 2020), в том числе и в России (Бондур и др., 2022; Захаров и др., 2018; Захарова и др., 2022; Михайлов и др., 2014; Смольянинова, Михайлов, 2024, 2025; Смольянинова и др., 2019, 2021, 2022; Bondur et al., 2021). Методом РСА-интерферометрии по разности фаз сигналов, отражённых от одной и той же площадки, определяется её смещение за период между съёмками. Прибрежный район Большого Сочи — это очень благоприятный район для применения РСА-интерферометрии. Плотная застройка обеспечивает большое количество отражателей радарного сигнала, благодаря пологому (до 20°) и сравнительно невысокому (до 500 м) рельефу зоны наложений, и тени, как и погрешности цифровой модели рельефа (ЦМР),

невелики, а отсутствие снегового покрова даёт возможность использовать круглогодичную съёмку. Данную территорию снимает спутник Sentinel-1 с восходящего 43A и нисходящего 123D трека практически непрерывно с интервалом 12 дней начиная с 2015 г. Это позволяет проводить детальное изучение динамики оползневых процессов на протяжении последних 10 лет и исследовать влияние на оползневую активность природных и антропогенных факторов. Для эффективного использования этого метода необходимо учитывать особенности РСА-съёмки, обработки радарных снимков и интерпретации полученных результатов.

Сотрудники Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта (ИФЗ РАН) занимаются изучением оползневых процессов в районе Большого Сочи с помощью метода InSAR по снимкам с различных спутников с 2012 г. (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2014; Смольянинова, Михайлов, 2024, 2025; Смольянинова и др., 2019, 2021, 2022; Kiseleva et al., 2014). Настоящая работа посвящена вопросам интерпретации результатов обработки снимков со спутника Sentinel-1 в прибрежном районе Большого Сочи за десятилетний период 2015–2025 гг. Особое внимание уделено вопросам оценки активизации склонов в последние годы. Представлено очередное обновление интерактивной карты деформаций поверхности для Центрального и Адлерского районов Сочи. Предыдущие версии были описаны в работах (Смольянинова, Михайлов, 2024, 2025; Смольянинова и др., 2022). Обновлённая версия представлена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/1214/display?panel=info>.

Использованные данные и их обработка

В работе использованы радарные снимки со спутника Sentinel-1A: 295 снимков с трека 43A и 278 снимков с трека 123D за период апрель 2015–март 2025 г. Для того, чтобы провести расчёты только в густонаселённой прибрежной полосе, а также для экономии машинных ресурсов при подборе параметров вычислений, из снимков были вырезаны по два участка с каждого трека (Центральный и Адлерский районы). На *рис. 1* показаны расчётные области. Для каждой области вычисления выполнены для двух периодов времени: апрель 2015–октябрь 2021 г. и ноябрь 2021–март 2025 г., что упрощает периодическое обновление карты, так как очередные расчёты проводятся начиная с 2021 г.

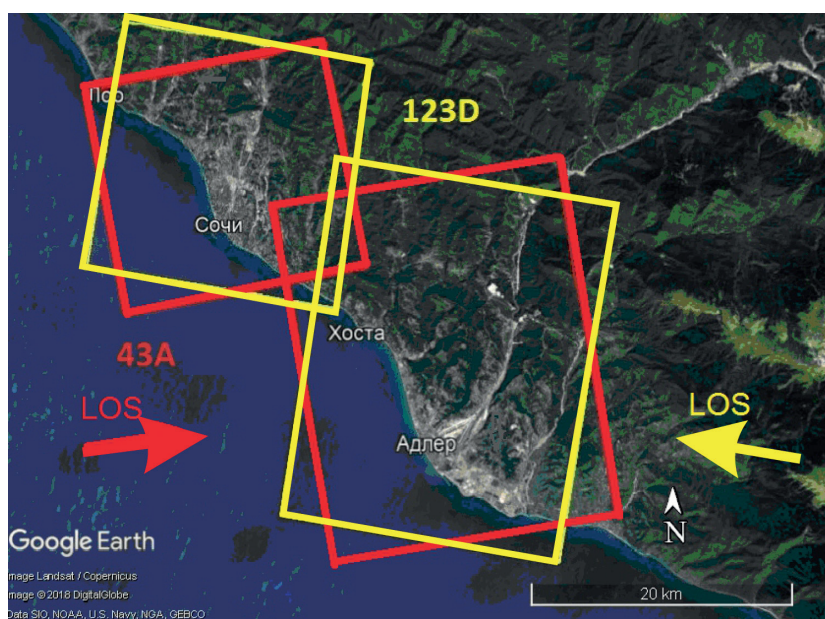


Рис. 1. Район исследований и расчётные области, вырезанные из радарных снимков спутника Sentinel-1A с восходящего (43A) и нисходящего (123D) трека. Направление визирования спутника LOS (англ. line-of-site) показано стрелками: жёлтой — с нисходящего трека, красной — с восходящего

Интерферометрическая обработка снимков и вычисления полей смещений осуществлялись 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). Карты построены 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>). При интерпретации полученных результатов применялись архивные данные о выпадении осадков с сайта «Расписание погоды» (<https://rp5.ru>) для метеостанции 37171 — аэропорт Сочи.

Результаты исследований

В работе в дополнение к сделанным ранее расчётам полей смещений за период 2015 — апрель 2021 г. представлены новые результаты для периода апрель 2021 — март 2025 г. На обновлённой карте для этого периода в виде слоёв показаны средние скорости смещений в направлении визирования спутника V_{los} и вдоль максимального градиента склонов V_{sd} (*англ.* slope down) (<https://adler.nextgis.com/resource/1214/display?panel=layers>). Под средними скоростями смещений в данной работе понимаются среднегодовые скорости. Пояснения к расчётам V_{sd} и отображению этих слоёв на карте приведены в публикации (Смольянинова, Михайлов, 2025).

Для оценки текущей активности процессов на оползневых склонах проведён расчёт суммарных смещений за последние полтора года (последний полный гидрогеологический год с ноября 2023 по ноябрь 2024 г. плюс ещё полгода с ноября 2024 по апрель 2025 г.) — $U_{\text{los23-25}}$. На карте отображены результаты вычислений $U_{\text{los23-25}}$ в виде слоёв $U_{\text{оп}}$ с выделенными опасными областями, абсолютные значения суммарных смещений в которых превышают за этот период 50 мм — величину, принятую за пороговый уровень опасности. Выделенные области независимо от направления смещений (к спутнику или от него) на карте окрашены в розовый цвет, а все смещения ниже уровня опасности — в тёмно-зелёный. Выбор периода расчёта связан с тем, что в ноябре — декабре 2024 и феврале 2025 г. после значительного выпадения осадков по наземным данным отмечались существенные подвижки на многих оползневых склонах, и в настоящей работе была предпринята попытка оценить опасность активизировавшихся склонов. Величина порогового уровня была установлена из тех соображений, что смещения, превышающие 50 мм, уверенно определяются при визуальных обследованиях местности. Для опасных областей в пронумерованных и отмеченных ромбическими звёздами точках были построены графики временных серий смещений за период 2021—2025 гг. Координаты этих точек представлены в виде слоя, а графики отображаются во всплывающих окнах. При щелчке мышью на ромбической звезде появляется окно, где во вкладке «Вложения» можно увидеть пиктограммы графиков в соответствующей точке. Щелчок мыши на пиктограмме открывает график на весь экран.

Фрагменты карт с изображёнными слоями V_{los} и $U_{\text{оп}}$ для участка Адлерского района представлены на *рис. 2а* и *б* (см. с. 174). Средняя скорость V_{los} за четырёхлетний период наблюдений в области А составляет около 20 мм/год и аналогична таковой в соседних областях В и С (см. *рис. 2а*). Однако в области А зафиксирован участок, где $U_{\text{los23-25}}$ превышает установленный уровень опасности (см. *рис. 2б*), что может говорить об активизации оползневых процессов в этой области в последние полтора года. Иллюстрирующие этот факт графики временных серий показаны на *рис. 2г*. На графике для области А выделяется момент активизации в феврале 2024 г. после обильных и продолжительных дождей в ноябре — декабре 2023 г.

Для пронумерованных и отмеченных розовым цветом на слоях $U_{\text{оп}}$ областей, где $U_{\text{los23-25}} > 50$ мм, были построены графики временных серий смещений за период 2021—2025 гг. (*рис. 3*, см. с. 175). Следует отметить, что если склон обращён от спутника, то оползневые смещения вниз по склону всегда будут увеличивать расстояние от спутника, они считаются отрицательными. Оползневые смещения на не слишком крутых склонах, обращённых к спутнику, положительные.

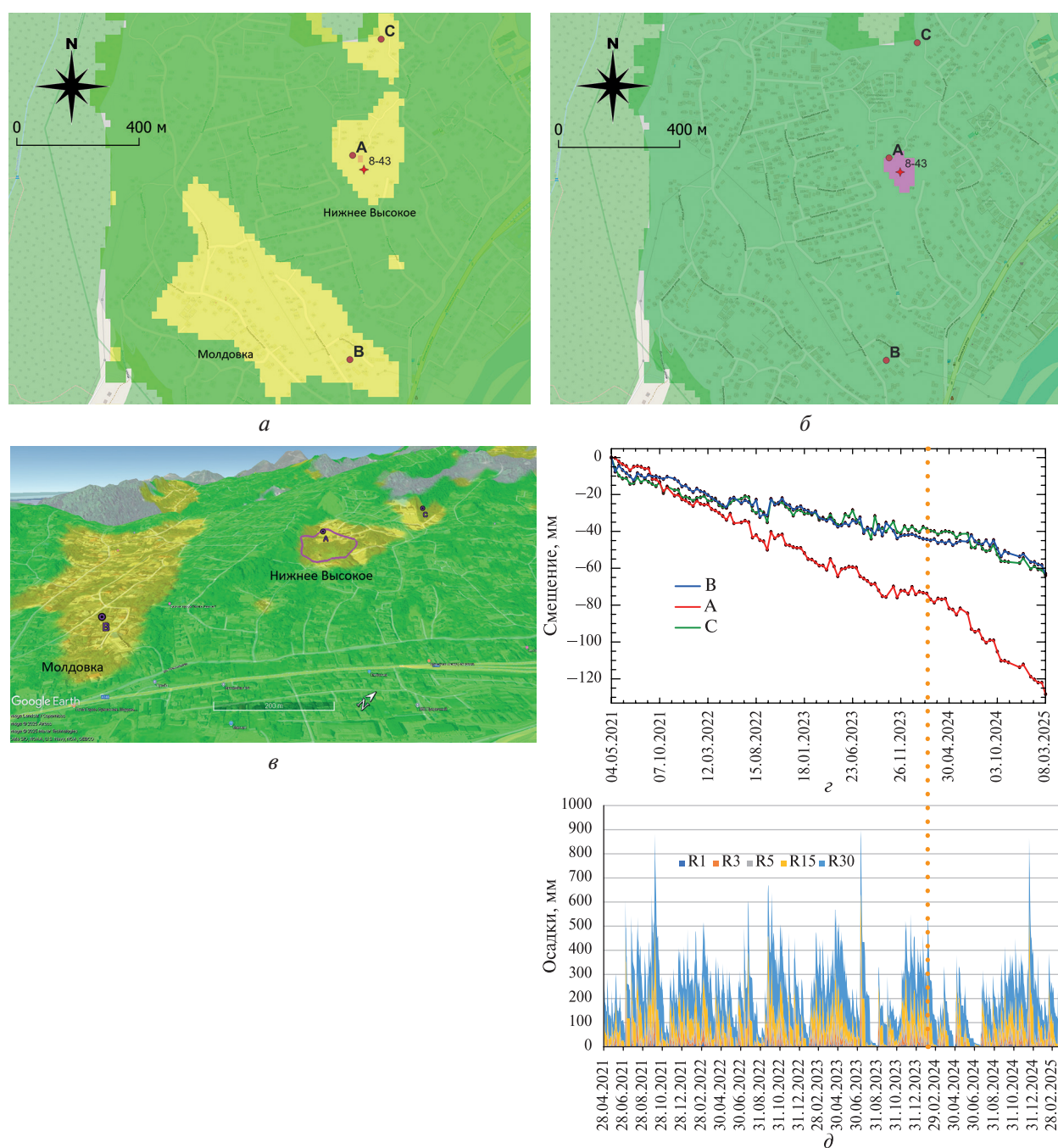


Рис. 2. Фрагменты карт для участка Адлерского района: *а* — средние скорости смещений в направлении LOS V_{los} за период апрель 2021 — март 2025 г. (трек 43А); *б* — смещения $U_{оп}$ (пояснения в тексте); *в* — фрагменты, представленные на *а* и *б*, на карте Google Earth. Розовый контур — область опасных смещений, показанная на *б*. Временные серии смещений для областей А, В, С (*г*) и количество выпавших осадков (в мм), суммированное за 1, 3, 5, 15, 30 дней (соответственно R1, R3, R5, R15, R30) (*д*).

Оранжевая пунктирная линия — момент активизации в области А

Графики временных серий смещений на рис. 3 объединены в соответствии со смещениями в направлении LOS. В работах (Handwerger et al., 2022; Liu et al., 2024) отмечалось, что непрерывные медленные смещения при отсутствии значительных изменений внешних факторов редко приводят к сходам оползней. Существенно более опасными являются области деформации со ступенчатыми графиками временных серий смещений, отражающими чередование ускоренных движений с периодами их отсутствия. По графикам, представленным на рис. 3, было выделено 11 областей, поведение которых представляется наиболее потенциально опасным. На интерактивной карте это области с номерами 2, 4, 5, 12, 13, 15, 18, 21, 23, 33, 35.

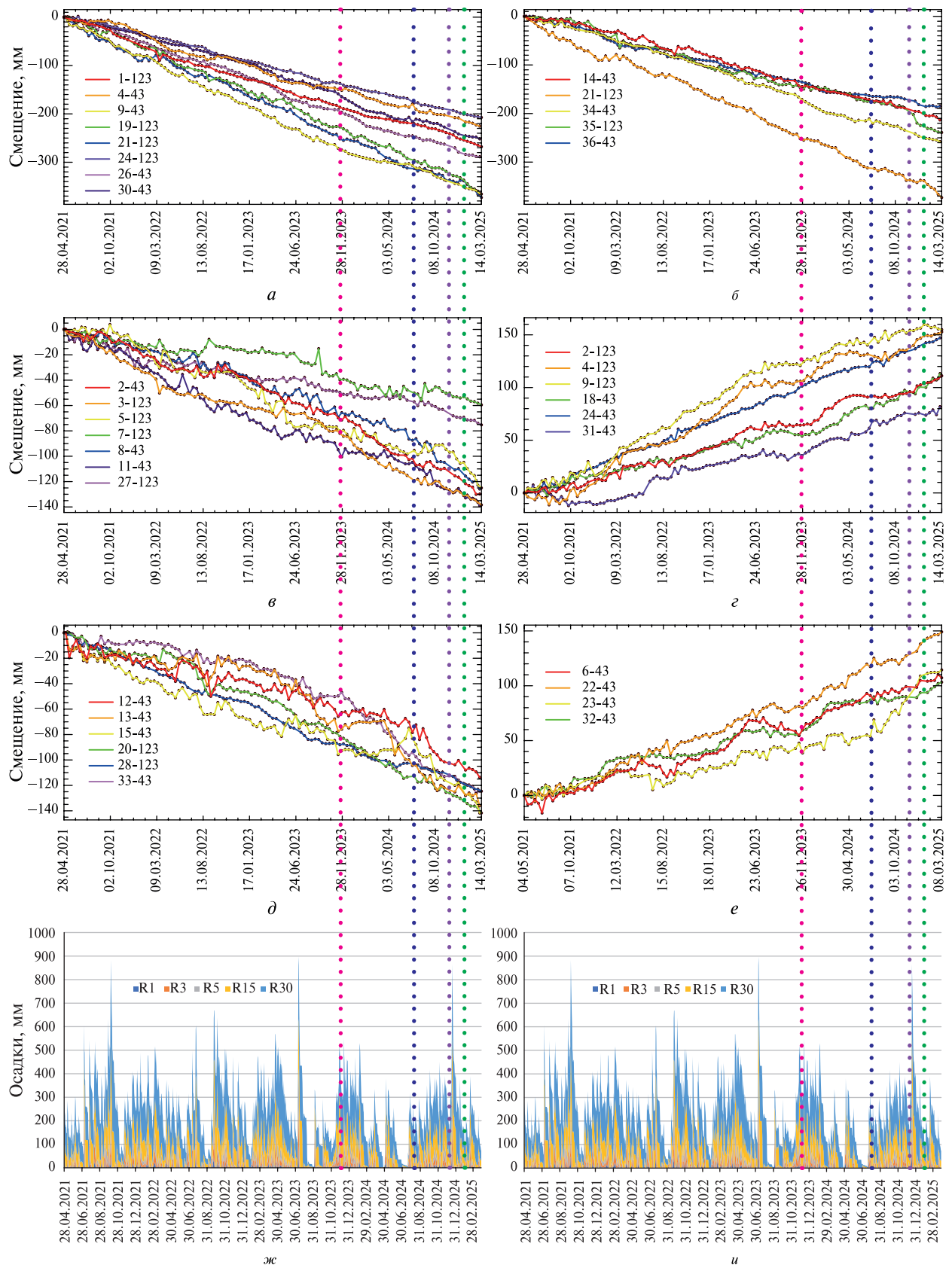


Рис. 3. Временные серии смещений для областей, где $U_{10s23-25} > 50$ мм (а–е). Номера графиков показывают номер области на интерактивной карте, через дефис — номер трека. Выпадение осадков (в мм), суммированное за 1, 3, 5, 15, 30 дней (соответственно R1, R3, R5, R15, R30) (ж, и). Вертикальные пунктирные линии — моменты максимумов суммарного выпадения осадков, инициировавшие активизации на оползневых склонах

На рис. 2 и 3 представлены также результаты суммирования за 1, 3, 5, 15 и 30 дней данных о выпадении осадков, что позволяет для каждого оползневого склона детально анализировать зависимость периодов активизации от количества и длительности выпадения осадков.

На веб-карте также обновлена информация о наземных проявлениях оползневых процессов по данным ФБУ «Гидроспецгеология» (<https://geomonitoring.ru/MEGP.html>). Однако следует учитывать, что по информации из опубликованных на этом сайте сводок, координаты оползневых проявлений приводятся ориентировочно, часто по данным СМИ.

Обсуждение

В работах (Смольянинова и др., 2019, 2021, 2022) было показано, что в густонаселённой прибрежной части Большого Сочи при мониторинге оползневых процессов данные InSAR и наземных наблюдений дополняют друг друга и их целесообразно использовать совместно, с учётом особенностей каждого метода. InSAR позволяет регистрировать малые медленные смещения до первых сантиметров в год, которые при обычных визуальных обследованиях оползневых склонов идентифицировать удаётся редко. В то же время быстрые и значительные по величине смещения (порядка метров), которые обычно отмечаются в результате визуальных наблюдений, либо вообще нельзя зафиксировать методом InSAR из-за потери корреляции снимков, либо затруднительно достоверно зарегистрировать их величину из-за ошибок развёртки фазы. Суть в том, что разность фаз спутникового сигнала, отражённого от одной и той же отражающей площадки при первой и второй съёмке, меняется в интервале от $-\pi$ до π , т. е. истинная разность фаз свёрнута по модулю 2π . Для восстановления истинной фазы применяется процедура так называемой развёртки фазы, т. е. к свёрнутым значениям прибавляется целое число полных периодов 2π . Эта операция является неоднозначной и выполняется под условием, что разность фаз в соседних элементах (пикселях) не превосходит половины периода, т. е. π . В ряде случаев с помощью InSAR удаётся зафиксировать смещения в окрестности области будущей основной подвижки или некие предварительные малые смещения. В случае значительных смещений можно применять менее точные методы офсетов, в которых анализ проводится не по фазовой, а по амплитудной составляющей радарного снимка (см., например, (Киселева и др., 2015)).

Зоны тени и наложения изображений в горных областях, а также отсутствие когерентности снимков на территориях, покрытых растительностью, также ограничивают возможности методов InSAR. Однако методы InSAR дают хорошие детальные результаты на территориях с густой застройкой, где сложно бывает провести наземные обследования. По наземным данным подавляющее большинство оползневых проявлений регистрируется в результате визуальных обследований открытых территорий или по сообщениям в СМИ. Всё это объясняет тот факт, что на представленной нами карте участки оползневых проявлений, зафиксированные по наземным данным, не всегда совпадают с областями активных деформаций по методу InSAR. Это обуславливает перспективность совместного применения наземных и спутниковых данных для повышения эффективности мониторинга оползневой активности в данном регионе.

Особого анализа заслуживают случаи, когда на одном и том же участке по наземным данным отмечается оползневое проявление, а по данным InSAR и с восходящего, и с нисходящего трека средние скорости смещений близки к нулю. Это может быть связано с несколькими причинами. Смещения параллельно орбите не могут быть зафиксированы методом InSAR, поскольку они не изменяют расстояние от отражающей площадки до спутника. Восходящая и нисходящая орбита близки к направлению север-юг, поэтому смещения на север или юг входят в U_{los} с малым коэффициентом. Таким образом, если оползень движется ориентировочно вдоль линии север-юг, его смещения в направлении LOS оказываются малыми. Второй причиной малых величин средней скорости V_{los} при зафиксированных в результате наземных исследований значительных подвижках могут быть рассмотренные ранее ошибки развёртки фазы, которые способны уменьшать амплитуду поля смещений по InSAR. Кроме того, средняя скорость смещений V_{los} за длительный интервал может

не показать кратковременную подвижку, которая регистрируется при визуальных обследованиях склона, хотя такая подвижка может быть видна на временных рядах смещений V_{los} .

В качестве примера последнего случая можно привести участок с координатами 43,53946° с.ш. и 39,80219° в.д. По информации СМИ, 13 апреля 2023 г. на 189 км автодороги А-147, Хостинский район, г. Сочи, произошёл сход оползня. Оползень активизировался в верховом откосе автодороги. В результате активизации оползневой процесса было повалено несколько деревьев, движение автотранспорта было временно ограничено. Однако по данным InSAR и с восходящего, и с нисходящего трека средние скорости смещений на этом участке близки к нулю. Достоверно оценить скорости вдоль склона V_{sd} в этой точке не удалось. Построенный для этого участка график временной серии (рис. 4) позволяет зафиксировать относительное увеличение скорости смещений в период с апреля 2023 г. до апреля 2024 г., совпадающее со временем наземных обследований (прямоугольник на рис. 4). Но поскольку за весь период 2021–2025 гг. суммарное смещение мало, то на карте средних скоростей V_{los} это событие не выделяется.

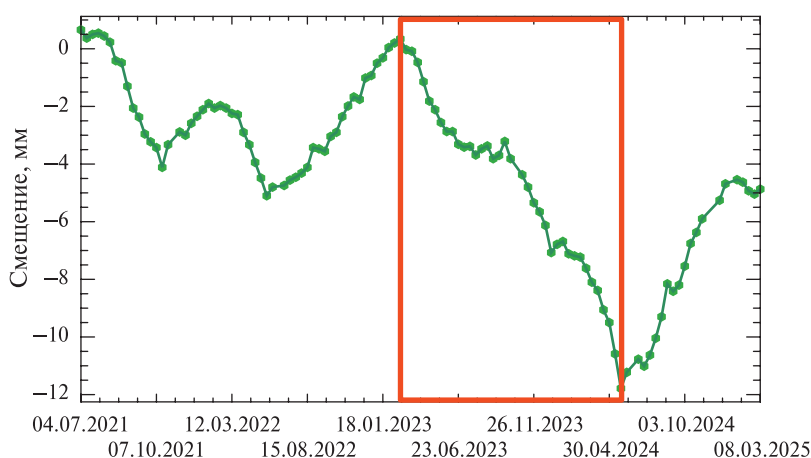


Рис. 4. Временная серия смещений области с координатами 43,53946° с.ш. и 39,80219° в.д. Красный прямоугольник — период активизации оползневой процесса. Объяснения в тексте

Отсюда следует, что невысокие абсолютные значения средней скорости смещений в направлении LOS не всегда свидетельствуют о низкой оползневой опасности. При этом выделенные области, в которых наблюдались достаточно интенсивные смещения за последний гидрогеологический год, необязательно представляют существенную оползневую опасность, например, области 1 и 26 (см. рис. 3а). В обоих этих случаях при V_{los} порядка 80–100 мм/год смещения происходят непрерывно, и катастрофических подвижек за период наблюдений 2015–2025 гг. зарегистрировано не было.

Следует также иметь в виду, что оползневую опасность могут представлять склоны, не попавшие в число опасных областей, выделенных по интенсивным смещениям за последний гидрогеологический год. Это, как уже отмечалось, может происходить из-за ориентации склона, вследствие чего значения V_{los} могут быть значительно меньше истинных. Кроме того, часто перед сходом оползня наблюдается период относительной стабильности различной продолжительности, в течение которого происходит накопление грунтовых масс и влаги, обуславливающее последующий сход оползня. Такие склоны также не попадают в рассмотренную группу, но могут представлять большую опасность.

Вопрос об оползневой опасности каждой из выделенных зон, так же как и любого оползневой склона, может быть рассмотрен отдельно на основе анализа временных серий смещений за длительный период времени, построенных для различных участков склонов.

Необходимо отметить, что на большинстве оползневых склонов, зафиксированных как потенциально опасные, активизация началась осенью 2024 г. после интенсивного и про-

должительного выпадения осадков, последовавших вслед за засушливым летом (см. *рис. 3*). Особо следует обратить внимание на характер выпадения аномального количества осадков в декабре 2024 г., когда произошла массовая активизация оползневых склонов. Так, с 11 по 13 декабря выпало 45 мм осадков, потом в течение двух дней осадки не выпадали, и, видимо, происходило впитывание в почву выпавших осадков, а потом с 16 по 18 декабря осадки приняли ливневый характер и выпала почти месячная норма — 160 мм. Вышеописанное сочетание погодных условий, очевидно, является в данном регионе наиболее опасным.

Выводы

В прибрежной части района Большого Сочи методы РСА-интерферометрии (InSAR) весьма эффективны при выделении областей активных деформаций и оценке оползневой опасности склонов. В результате интерпретации полей смещений, полученных методами РСА-интерферометрии за период 2021–2025 гг., было выявлено 36 потенциально опасных областей активных деформаций, из которых 11 предполагаются наиболее опасными. Эти участки отмечены на интерактивной карте (<https://adler.nextgis.com/resource/1214/display?panel=layers>). Для зафиксированных потенциально опасных областей представлены графики временных серий, которые позволяют выделять периоды относительного покоя и активизации. Совместное рассмотрение этих графиков с данными о выпадении осадков позволяет анализировать оползневую опасность склонов.

Изучение поведения конкретных оползневых склонов при выпадении осадков может помочь в прогнозировании их активизации, сопровождающейся значительными подвижками, в том числе и катастрофическими.

Использование данных РСА-интерферометрии может быть полезным при проектировании и мониторинге эффективности сооружений инженерной защиты, предотвращающих негативное воздействие оползневых процессов.

Работа выполнена в рамках госзадания ИФЗ РАН.

Литература

1. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. Оценка реактивации оползня на реке Бурей методами радарной интерферометрии // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2022. Т. 502. № 2. С. 83–89. <https://doi.org/10.31857/S2686739722020025>.
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. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Красногорский М. Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92. DOI: 10.7868/S0205961418030065.
4. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Синило В. П. Исследование многолетней динамики Бурейского оползня методом космической радиолокационной интерферометрии // ГеоРиск. 2022. Т. 16. № 3. С. 20–34. <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-3-20-34>.
5. Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И., Тимошкина Е. П., Дмитриев П. Н. Комплексирование методов анализа амплитуды и фазы спутниковых радарных снимков для оценки смещений оползневых склонов // Вестн. Московского гос. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. 2015. № 4. С. 34–43.
6. Михайлов В. О., Киселева Е. А., Смольянинова Е. И., Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Дорохин К. А., Тимошкина Е. П., Хайретдинов С. А. Некоторые проблемы мониторинга оползневых процессов с использованием спутниковых радарных снимков с различной длиной волны на примере двух оползневых склонов в районе Большого Сочи // Физика Земли. 2014. № 4. С. 120–130.

7. 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.
8. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О. Мониторинг оползневой активности склонов в районе Большого Сочи за период 2015–2024 гг. по данным РСА-интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 69–78. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78.
9. 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.
10. Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н. Выявление и мониторинг областей активных деформаций в Адлерском районе Большого Сочи путём анализа серий разночастотных спутниковых 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.
11. 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.
12. 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.
13. Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A., Dagurov P. Fusion of SAR interferometry and polarimetry methods for landslide reactivation study, the Bureya River (Russia) event case study // Remote Sensing. 2021. V. 13. No. 24. Article 5136. <https://doi.org/10.3390/rs13245136>.
14. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M. et al. Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 115. P. 78–89. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
15. Handwerger A., Fielding E., Sangha S., Bekaert D. Landslide sensitivity and response to precipitation changes in wet and dry climates // Geophysical Research Letters. 2022. V. 49. Article e2022GL099499. <https://doi.org/10.1029/2022GL099499>.
16. 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.
17. Li X., Handwerger A., Peltze G., Fielding E. Exploring the behaviors of initiated progressive failure and slow-moving landslides in Los Angeles using satellite InSAR and pixel offset tracking // Geophysical Research Letters. 2024. V. 51. Article e2024GL108267. <https://doi.org/10.1029/2024GL108267>.
18. Mondini A., 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>.
19. 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. <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.
20. 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>.

On the interpretation of the results of SAR interferometry in the study of landslide activity in the coastal region of Big Sochi based on Sentinel-1 satellite images for 2015–2025

E. I. Smolyaninova, V. O. Mikhailov

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

The coastal area of Big Sochi belongs to the territories with a high landslide risk. The increasing anthropogenic load in this region places high demand on monitoring of landslide activity. This work is a continuation of research on the use of satellite radar interferometry (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 43A (295 images) and descending 123D (278 images) tracks for the period 2015–2025. The map is available at <https://adler.nextgis.com/resource/1214/display?panel=info>. The images were processed using the SBAS (Small Baseline Subset) method in the ENVI SARscape package v 5.3. Based on the results of interferometric image processing, the map features as layers the annual average values of the displacement rates in the direction of line of sight of the satellite and along the slope for two periods: 2015–2021 and 2021–2025. In addition, to assess the current activity of landslide processes, the displacement has been calculated over the past year and a half. The results are displayed on the map as layers with highlighted areas where the absolute values of the displacements exceed 50 mm during this period, which is the value assumed to be the threshold level of danger. During the period 2021–2025, 36 potentially dangerous areas of active deformations have been identified and marked on the map, of which 11 are considered the most dangerous. For the identified potentially dangerous areas, time series graphs are presented together with precipitation data, which make it possible to identify periods of relative stability and activation. It is shown that the most dangerous is intense precipitation after a dry summer. The features of interpretation of InSAR in comparison with ground-based data are discussed in detail.

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

Accepted: 02.10.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-171-181

References

1. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N., Assessment of the Bureya river landslide reactivation using the persistent scatter interferometry, *Doklady Earth Sciences*, 2022, V. 502, No. 1–2, pp. 31–36. DOI: 10.1134/S1028334X22020027.
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 case of landslide monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, V. 9, No. 2, pp. 130–142 (in Russian).
3. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorskii M. G., Monitoring of the landslide activity using radar interferometric observations of trihedral corner reflectors, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 80–92 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030065.
4. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Sinilo V. P., Study of long-term dynamics of the Bureya landslide using spaceborne SAR interferometry, *GeoRisk World*, 2022, V. 16, No. 3, pp. 20–34, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-3-20-34>.
5. Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolyaninova E. I., Timoshkina E. P., Dmitriev P. N., The combination of methods for analyzing the amplitude and phase of satellite radar images for the estimation of displacements on landslide-affected slopes, *Moscow Univ. Physics Bull.*, 2015, V. 70, No. 4, pp. 303–311.
6. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smolyaninova 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 with different wavelengths: case study of two landslides in the region of Greater Sochi, *Fizika Zemli*, 2014, No. 4, pp. 120–130 (in Russian).
7. 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 prob-*

- lemy distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 73–83 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-73-83.
8. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Monitoring of landslide activity in the Big Sochi region using InSAR for the period 2015–2024, *Sovremennye problemy distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 69–78 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-69-78.
9. 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 distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
10. 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 distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 55–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.
11. 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 distantcionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 4, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
12. 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.
13. Bondur V., Chimitdorzhiyev T., Dmitriev A., Dagurov P., Fusion of SAR interferometry and polarimetry methods for landslide reactivation study, the Bureya River (Russia) event case study, *Remote Sensing*, 2021, V. 13, No. 24, Article 5136, <https://doi.org/10.3390/rs13245136>.
14. Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M. et al., Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, V. 115, pp. 78–89, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
15. Handwerger A., Fielding E., Sangha S., Bekaert D., Landslide sensitivity and response to precipitation changes in wet and dry climates, *Geophysical Research Letters*, 2022, V. 49, Article e2022GL099499, <https://doi.org/10.1029/2022GL099499>.
16. 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.
17. Li X., Handwerger A., Peltze G., Fielding E., Exploring the behaviors of initiated progressive failure and slow-moving landslides in Los Angeles using satellite InSAR and pixel offset tracking, *Geophysical Research Letters*, 2024, V. 51, Article e2024GL108267, <https://doi.org/10.1029/2024GL108267>.
18. Mondini A., 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>.
19. 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, <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.
20. 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>.