

Анализ смещений оползневых склонов в районе Большого Сочи по данным РСА-интерферометрии на примере оползня в селе Сергей-Поле (коттеджный посёлок Горная Поляна)

Е. И. Смольянинова, В. О. Михайлов

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

Постоянно увеличивающаяся с ростом антропогенной нагрузки оползневая опасность в районе Большого Сочи обуславливает актуальность привлечения современных спутниковых методов для мониторинга оползневой активности. Целью исследований было показать возможности использования метода спутниковой радарной интерферометрии (InSAR) для изучения оползневой опасности этого региона. 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 (190 снимков) и нисходящего 123D (173 снимка) треков за период 2015–2023 гг. Карта размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/879/display?panel=info>. Обработка снимков проводилась методом SBAS (*англ.* Small Baseline Subset) в пакете ENVI SARscape v.5.3. На карте в виде слоёв показаны результаты расчётов средней скорости смещений в направлении на спутник. Отмечены наиболее существенные области активных деформаций поверхности, представлены графики временных серий смещений и информация об оползневых проявлениях по наземным данным. Новым является проведение расчётов средней скорости смещений вниз по склону и их представление в виде дополнительных слоёв на обновлённой карте, а также демонстрация возможностей применения InSAR при оценке оползневой опасности в данном регионе на примере оползневого склона в с. Сергей-Поле (коттеджный пос. Горная Поляна), где в октябре 2021 г. сошёл мощный оползень. Проанализированы временные серии смещений на различных участках этого оползневого склона совместно с графиками выпадения осадков, просуммированными за 1, 3, 5, 15 и 30 сут. Установлено, что до момента схода оползня в верхней части склона смещения наблюдались постоянно и достигали 200 мм в направлении на спутник, иногда чередуясь с относительно короткими периодами замедления. Также устойчиво смещались точки на западном склоне над посёлком. Всё это являлось признаком высокой оползневой опасности. Выявлено, что особую опасность представляют длительные периоды стабильности в низовых частях оползня в процессе аккумуляции осадков (при непрекращающихся дождях). Аномальное количество аккумулярованных за весь 2021 г. осадков было существенно большим, чем в предыдущие годы, оно продолжало расти, начиная с июля 2021 г., и инициировало сход мощного оползня 5 октября 2021 г.

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

Одобрена к печати: 17.04.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-73-83

Введение

Высокая оползневая опасность района Большого Сочи, которая постоянно увеличивается с ростом антропогенной нагрузки, обуславливает необходимость привлечения современных методов мониторинга оползневой активности. В последние годы при изучении оползней успешно используются снимки со спутников, оснащённых радарными с синтезированной апертурой (РСА). В результате интерферометрической обработки этих снимков (методы РСА-интерферометрии, *англ.* Interferometric synthetic aperture radar — InSAR) удаётся получить поля смещений земной поверхности с точностью до первых сантиметров, а по временным рядам оценивать среднюю скорость смещений на уровне миллиметров в год, что позволяет выявлять области активных смещений. Метод InSAR широко применяется в мировой практике при изучении оползней. Описание большого количества работ по этому вопросу

можно найти в обзорах (Mondini et al., 2021; Solari et al., 2020). Делаются попытки прогнозирования оползневых процессов с использованием данных InSAR (например, (Moretto et al., 2021; Zhang et al., 2020)). В России работы по применению спутниковой интерферометрии при изучении оползневых процессов пока не столь многочисленны (например, (Бондур и др., 2019; Дмитриев и др., 2012; Захаров и др., 2018, 2022; Михайлов и др., 2014; Смольянинова и др., 2019–2022; Bondur et al., 2021)).

В прибрежной части Большого Сочи имеются весьма благоприятные условия для применения РСА-интерферометрии. Плотная застройка обеспечивает большое количество отражателей радарного сигнала, а достаточно пологий рельеф (углы падения — в основном максимум до 20–30°) позволяет минимизировать погрешность, обусловленную топографией. Преобладают медленные смещения поверхности (порядка нескольких сантиметров в год), которые хорошо регистрируются этим методом. Медленные смещения обычно не приводят к катастрофическим последствиям, однако причиняют значительный экономический ущерб, в том числе в результате деформаций дорог, зданий и сооружений. Степень опасности областей, где наблюдается оползневая активность, характеризуется не только величиной средней скорости смещений, но и вариациями скорости смещений, частотой и продолжительностью периодов ускорений. Имеется большое количество архивных радарных снимков Большого Сочи, выполненных с восходящих и нисходящих орбит спутниками Sentinel-1 с интервалом между съёмками 6–12 дней, в настоящее время регулярная съёмка спутником Sentinel-1A продолжается. Это позволяет весьма точно фиксировать изменение скорости смещений земной поверхности.

Мониторинг оползневых процессов в районе Большого Сочи ведётся сотрудниками Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН более 10 лет. Исследовались оползневые склоны в Центральном и Адлерском районах, микрорайоне Мамайка, вдоль дороги на Красную Поляну, в районе Роза Хутор и др. В работе (Смольянинова и др., 2022) была представлена интерактивная карта скорости деформаций земной поверхности для района Большого Сочи, построенная на базе снимков со спутника Sentinel-1A за шесть лет (2015–2021). На этой карте в наглядной форме в виде слоёв средней скорости смещений в направлении визирования спутника V_{los} (англ. line of sight) были представлены результаты расчётов полей смещений земной поверхности и выделены области активных деформаций (ОАД). В данной работе мы представляем обновлённую интерактивную карту для более длинной серии снимков (до 2023 г.) и демонстрируем возможности анализа временных серий смещений в выделенных на карте ОАД. В качестве примера выбран оползневой склон в с. Сергей-Поле, где в октябре 2021 г. сошёл мощный оползень.

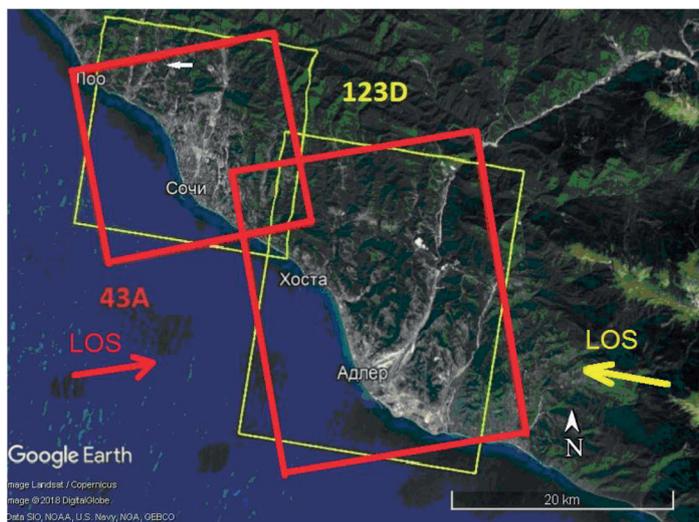
Район исследований, использованные данные и их обработка

При построении карты деформаций земной поверхности для района Большого Сочи были использованы радарные снимки со спутника Sentinel-1A: 190 снимков с восходящей орбиты 43A и 173 снимка с нисходящей орбиты 123D за период апрель 2015 г. — сентябрь 2023 г. На *рис. 1* (см. с. 75) показаны расчётные области и положение оползня в с. Сергей-Поле (коттеджный пос. Горная Поляна). С целью экономии вычислительных ресурсов расчёты проводились отдельно для Центральной части и Адлерского р-на. Кроме того, для каждой области расчёты выполнены для двух периодов: апрель 2015 г. — октябрь 2021 г. и ноябрь 2021 г. — сентябрь 2023 г. Это упрощает периодическое обновление карты, так как очередные расчёты проводятся, начиная с 2021 г. В тех точках, где значения смещений получены за оба периода, графики временных серий смещений строятся за весь период наблюдений, начиная с 2015 г. Смещения за период ноябрь 2021 г. — сентябрь 2023 г. суммируются со смещениями в конечной точке временной серии за период апрель 2015 г. — октябрь 2021 г.

Интерферометрическая обработка снимков и расчёты полей смещений проводились по методу SBAS (англ. Small Baseline Subset) (Berardino et al., 2002), реализованном в пакете ENVI SARscape v. 5.3.1. Описание методики расчётов приведены в работах (Смольянинова и др., 2019–2021).

Область активных деформаций в окрестности с. Сергей-Поле была выделена нами ранее по результатам интерферометрической обработки снимков и обозначена на интерактивной карте как ОАД 8. В данной работе мы детально рассматриваем участок в районе коттеджного пос. Горная Поляна, расположенный на территории древнего оползня, представленного делювиальными отложениями (рис. 2, см. с. 76). Последняя значительная подвижка наблюдалась здесь в 1978 г. при строительстве школы. Тогда стройку прекратили, но летом 2019 г. началось строительство коттеджного пос. Горная Поляна.

Рис. 1. Район исследований и расчётные области, покрываемые радарными снимками спутника Sentinel-1A с восходящей (43A) и нисходящей (123D) орбиты. Белой стрелкой показано местонахождение оползня в с. Сергей-Поле. Направление визирования спутника показано стрелками: жёлтой — с нисходящей орбиты, красной — с восходящей орбиты



Утром 5 октября 2021 г. мощный оползень сошёл по горному склону, сместив почти на 100 м большую часть коттеджного посёлка. К счастью, обошлось без жертв, но дома стали непригодны для жилья, а многоэтажные дома ЖК «Серебряный Бор» оказались в непосредственной близости от бровки оползня — обрыва высотой в несколько десятков метров. Общую картину района исследований можно увидеть на рис. 2 (см. с. 76), где результаты расчётов смещений нанесены на снимки Google Earth, выполненные до схода оползня и после него.

Мы проанализировали временные серии смещений по данным РСА-интерферометрии на различных участках рассматриваемого оползневых склона, чтобы получить более детальное представление об этом масштабном явлении. Графики временных серий были рассмотрены совместно с графиками выпадения осадков, поскольку в подавляющем большинстве случаев именно этот фактор обуславливает увлажнённость грунтов и способствует сходу оползня.

При построении графиков выпадения осадков использовались архивные данные с сайта <https://tr5.ru> для метеостанции 37171 аэропорта Сочи. Для того чтобы проанализировать связь между количеством осадков и активизацией оползневых процессов на отдельных участках оползневых склона, архивные данные о выпавших осадках были просуммированы за 1, 3, 5, 15 и 30 дней.

Результаты исследований

В данной работе мы представляем обновлённую интерактивную карту деформаций поверхности для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи, которая размещена в сети Интернет по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/879/display?panel=info>. Технология построения карты описана в работе (Смольянинова и др., 2022). На этой карте в виде слоёв используются результаты расчётов средней скорости смещений V_{los} в направлении на спутник для восходящего трека 43A и нисходящего трека 123D для двух периодов времени: 2015–2021 и 2021–2023 гг.

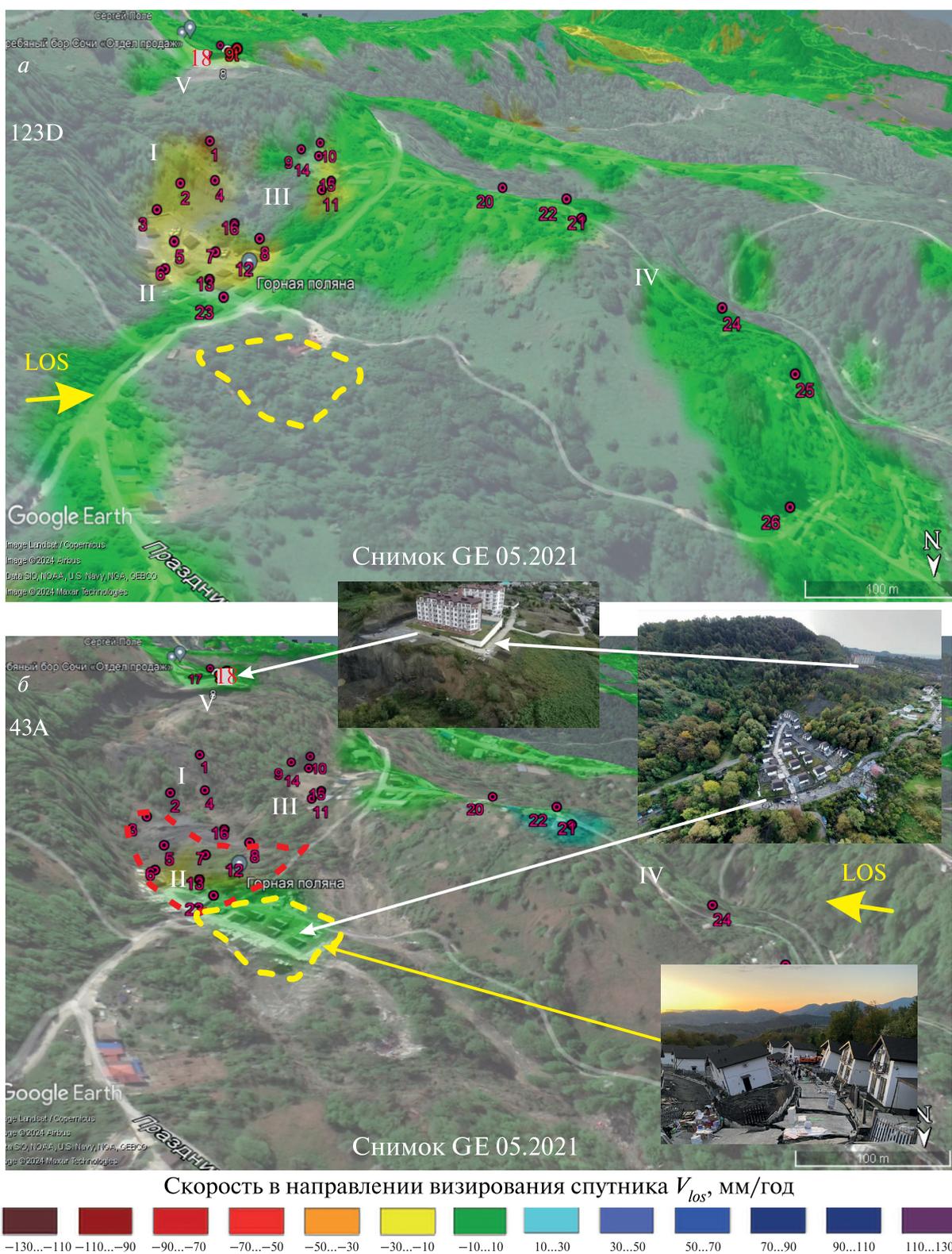


Рис. 2. Средняя скорость смещений поверхности в направлении на спутник (V_{los}) в окрестности пос. Горная Поляна, рассчитанная по снимкам спутника Sentinel-1A с сайта Google Earth (GE) от 05.2021 (до схода оползня) и 05.2023 (после схода оползня): а — за период 2015–2021 гг. с нисходящей орбиты (123D); б — за период 2021–2023 гг. с восходящей орбиты (43A). Снимки GE развернуты на 180°. Красный пунктир — положение посёлка до схода оползня, жёлтый пунктир — после схода. Точки с цифрами — это участки, для которых построены графики временных серий смещений. Группы точек, находящиеся на склонах с одинаковой (в среднем) экспозицией, обозначены римскими цифрами. Кривые временных серий смещений для каждой из этих групп показаны на рис. 4 и 5

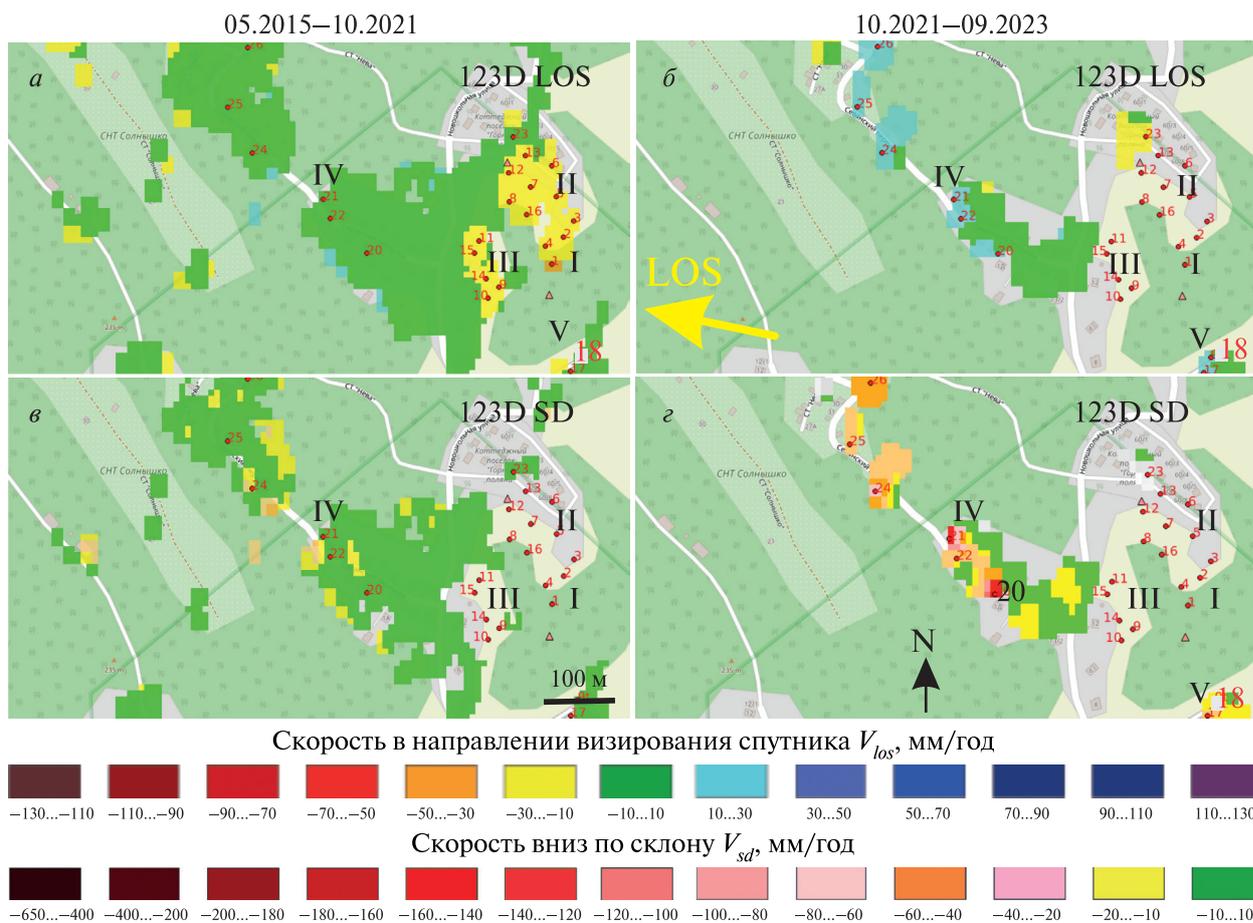


Рис. 3. Средняя скорость смещений поверхности в направлении на спутник (V_{los}) (а, б) и вниз по склону (V_{sd}) (в, г) в окрестности пос. Горная Поляна (ОАД 8), рассчитанная по снимкам спутника Sentinel-1A за периоды май 2015 г. – октябрь 2021 г. (а, в) и октябрь 2021 г. – сентябрь 2023 г. (б, г) с нисходящей орбиты 123D. Показаны скриншоты участков карты деформаций в районе ОАД 8. Карта размещена по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/879/display?panel=info>. Остальные обозначения те же, что на рис. 2

Отмечены наиболее существенные ОАД, для которых V_{los} превышает заданный порог в 10 мм/год. На обновлённой карте имеются также слои средней скорости смещений вниз по склону V_{sd} (англ. down the slope). Значение смещения вниз по склону V_{sd} вычисляется, исходя из геометрии съёмки и ЦМР (цифровая модель рельефа), по которой определяются экспозиции склонов и углы наклона. В данном случае скорость смещений вниз по склону V_{sd} рассчитывалась с использованием модуля SARscape пакета ENVI как проекция скорости в направлении визирования спутника V_{los} на направление максимальной крутизны склона. Полученные значения следует рассматривать только как оценочные. Это связано с тем, что в силу особенностей радарной съёмки, спутник не регистрирует смещения параллельные направлению своего полёта. Поэтому, когда направление смещения оползня приближается к направлению полёта спутника, коэффициент пересчёта V_{los} в V_{sd} неограниченно растёт и малые ошибки в оценке V_{los} порождают большие ошибки в оценке V_{sd} . На карте показаны только значения скорости вниз по склону V_{sd} , которые мы считаем достаточно достоверными. Основываясь на работе (Notti, 2014), не рассматриваются участки, где значения V_{sd} превышают значения V_{los} более чем в пять раз. Исключены положительные значения V_{sd} , так как смещения оползневых масс вверх по склону наблюдаются крайне редко. На обновлённой карте также представлена информация об оползневых проявлениях по наземным данным (Вожик, Шамурзаева, 2018) и ФГБУ «Гидроспецгеология» (http://geomonitoring.ru/inform_product.html).

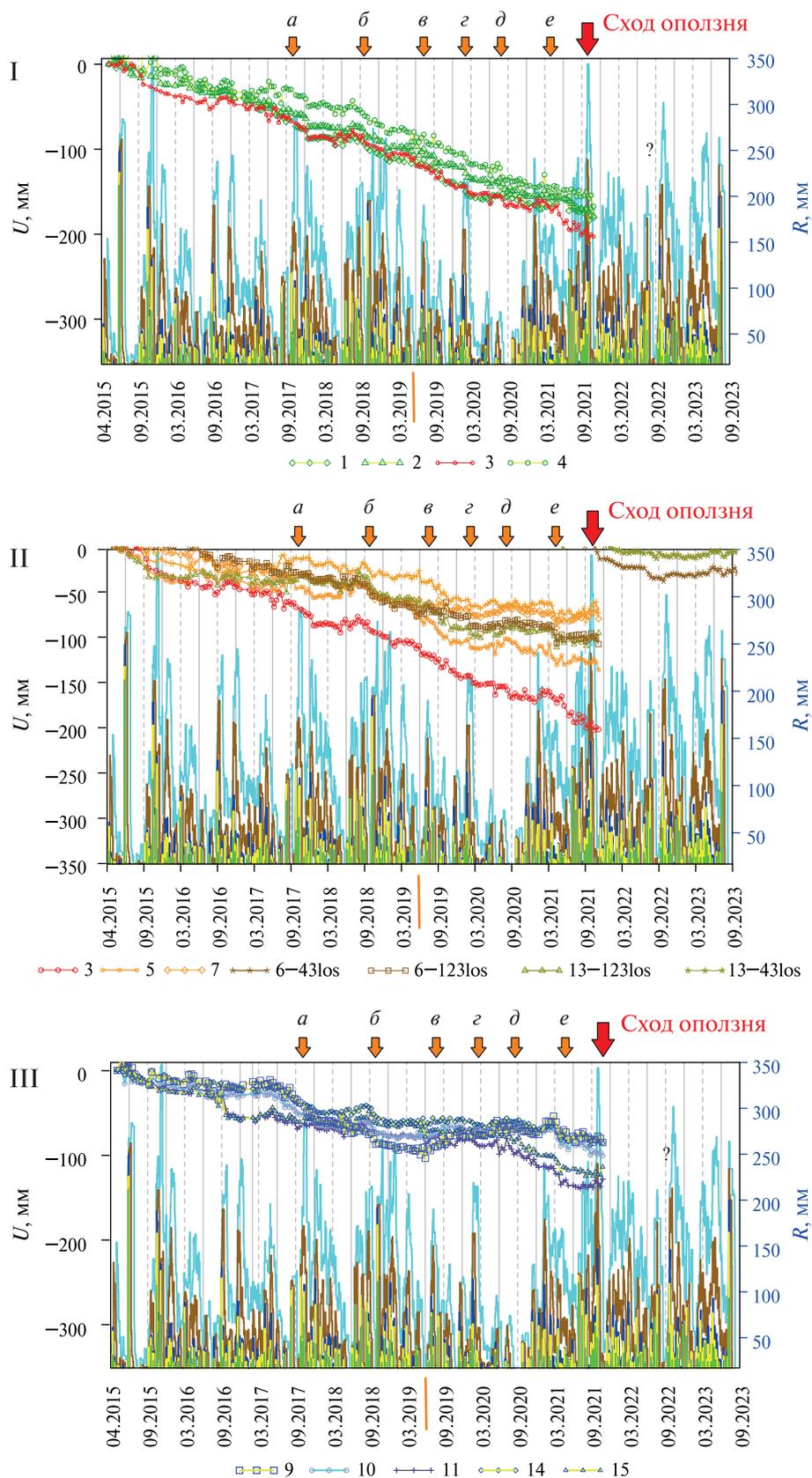


Рис. 4. Временные серии смещений для зон I–III и графики выпадения осадков. Стрелками а–е отмечены характерные моменты активизации оползневых склонов. Оранжевая полоска на временной оси отмечает время начала строительства коттеджного посёлка. Вопросительным знаком отмечен период времени, где после схода оползня отсутствует когерентность снимков. Легенда для графиков количества осадков размещена на рис. 5

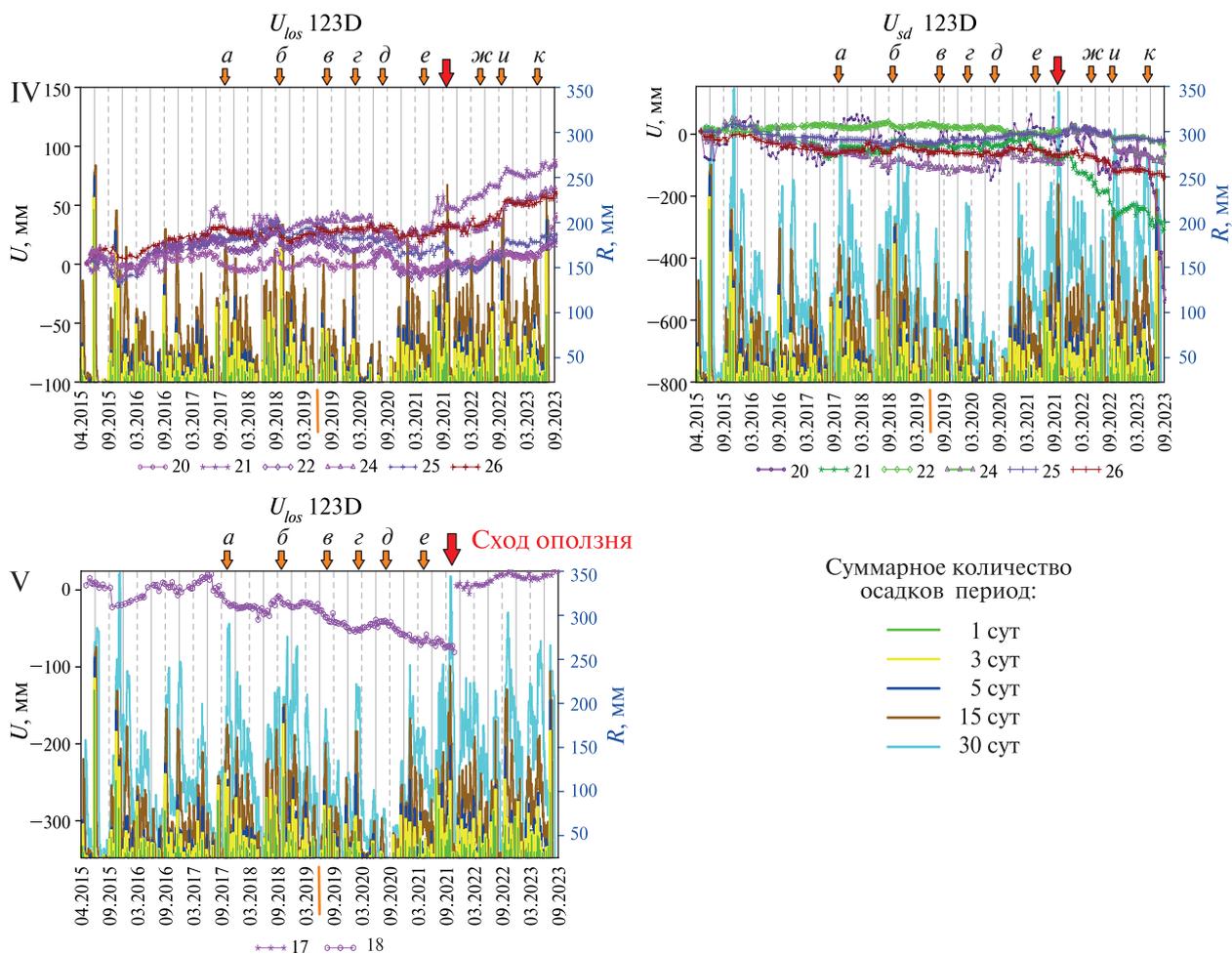


Рис. 5. Временные серии смещений для зон IV и V. Обозначения те же, что на рис. 4

Смещения поверхности оползневого склона за период 2015–2021 гг. (до схода оползня) достаточно хорошо фиксируются только с нисходящего трека 123D (см. рис. 2а). После схода оползня поверхность оползневого склона претерпела изменения, так что определить дальнейшие смещения поверхности самого склона с трека 123D стало невозможным, но зато некоторые его участки стали видны с восходящего трека 43А (см. рис. 2б). На рис. 2 обозначены точки, для которых были построены графики временных серии смещений за период наблюдений 2015–2023 гг. (рис. 4, 5, см. с. 78, 79), а также показано положение домов посёлка до и после катастрофического события.

Для подробного исследования динамики смещений оползневого склона было выделено пять основных зон: выше посёлка — I — юго-восточный склон (точки 1–4) и II — юго-западный склон (точки 9–11, 14–15), III — улицы коттеджного посёлка (точки 3, 5–8, 12, 13), IV — на западном склоне над посёлком (точки 20–26) и V — у верхней бровки оползня (точки 17, 18) (см. рис. 2 и 3, см. с. 77).

Результаты по треку 123D после схода оползня оказались информативными для окрестностей оползневого склона. На рис. 3 представлены средняя скорость смещений V_{los} и средняя скорость смещений вдоль склона V_{sd} , рассчитанные за периоды май 2015 г. — октябрь 2021 г. и октябрь 2021 г. — сентябрь 2023 г. (до и после схода оползня). Видно, что на западном склоне над сошедшим оползнем (зона IV точки 20–26) наблюдается существенное увеличение скорости смещений. Графики временных серий для этого участка представлены на рис. 5.

Обсуждение результатов

Анализируя кривые динамики смещений на *рис. 4* и *5* можно отметить следующее.

В течение всего периода наблюдений, начиная с 2015 г., периоды стабильности оползневых склонов в окрестности пос. Горная Поляна чередуются с их активизацией. Продолжительность этих периодов отличается на разных участках, и начальные моменты периодов активизации и стабильности не синхронны. Этим объясняется тот факт, что стрелки *a–e*, отмечающие на *рис. 4* и *5* характерные моменты активизации для разных зон (I–V), на временной оси не полностью совпадают. В большинстве случаев при пятидневном суммарном количестве осадков свыше 70–100 мм для всех зон наблюдаются кратковременные (1–2 мес) подвижки с амплитудой около 10 мм. Существенные изменения средней скорости смещений вызывают обильные осадки, аккумулированные за более длительные периоды.

Смещения во времени происходили неравномерно. Так, в июне 2020 г. на склонах вокруг посёлка в точках 1–5, 11, 14, 15, 20 произошли кратковременные подвижки (около 15 мм в направлении LOS за месяц), которые могли быть следствием довольно существенного количества осадков, выпавших в мае, и слабого землетрясения, произошедшего 20.06.2020 с эпицентром в 22 км от Сочи*. После этого небольшие смещения продолжали наблюдаться в точках 1–4 и точке 5, а на западном склоне, где расположены точки 11 и 15, началось интенсивное движение грунтовых масс со скоростью около 10 мм/мес в направлении LOS, продолжавшееся до ноября 2020 г., когда смещения прекратились практически повсеместно до весны 2021 г. В марте 2021 г. после большого суммарного количества осадков, выпавших зимой 2020/21 гг., смещения возобновились во всех точках зон I–IV. В мае 2021 г. смещения в зонах II–IV прекратились, а в зоне I смещения продолжали регистрироваться в точке 3, где с марта по май 2021 г. произошла подвижка примерно на 20 мм в направлении LOS с последующим замедлением смещений.

Выводы

Спутниковая РСА-интерферометрия несомненно является эффективным методом мониторинга оползневой опасности в условиях плотной застройки и невысокого рельефа прибрежной части Большого Сочи. На представленной обновлённой карте деформаций поверхности для Центрального и Адлерского районов (2015–2023) выделено 58 наиболее существенных областей активных деформаций поверхности (ОАД), практически все они (за редким исключением областей просадок) обусловлены оползневыми процессами. Карта размещена по адресу: <https://adler.nextgis.com/resource/879/display?panel=info>.

Приведённый в работе пример оползня в с. Сергей-Поле (пос. Горная Поляна) показывает, что спутниковая РСА-интерферометрия в данных условиях позволяет с высокой степенью детальности изучать динамику смещений оползневых склонов и выявлять периоды активизации, что становится важным шагом на пути к прогнозированию оползневой опасности.

Полученные результаты показывают, что в верхней части оползневых склонов в районе пос. Горная Поляна смещения наблюдались постоянно, иногда чередуясь с относительно короткими периодами замедления. С апреля 2015 г. по сентябрь 2021 г. смещения в направлении LOS на этом участке (точки 1–4) составили от 170 до 200 мм. Также устойчиво смещались точки на западном склоне над посёлком (точки 11 и 14). Всё это становится признаком высокой оползневой опасности.

Построение графиков временных серий смещений на различных участках склона позволяет выявить наиболее опасные участки и зафиксировать изменения средней скорости смещений. Так, в данном случае настораживающими фактами могли быть изменения скорости смещений в точках 11 и 14 осенью 2020 г. и в точке 3 весной 2021 г. Особую опасность представляют длительные периоды стабильности в низовых частях оползня в процессе аккумуля-

* <https://www.volcanodiscovery.com/ru/region/14241/zemletryaseniya/sochi-city.html#archive>.

ции осадков при непрекращающихся дождях (точки 5–7, 13). Аномальное количество аккумулярованных за весь 2021 г. осадков было существенно большим, чем в предыдущие годы. Оно продолжало расти, начиная с июля 2021 г. (более 300 мм за последний перед сходом оползня месяц), и инициировало сход мощного оползня 5 октября 2021 г.

Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (тема FMWU-2022-0018).

Литература

1. *Бондур В. Г., Захарова Л. Н., Захаров А. И. и др.* Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Бурья по данным интерферометрической съёмки радаров L-диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 113–119. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119.
2. *Вожик А. А., Шамурзаева Д. А.* Оперативное региональное прогнозирование активности оползневого процесса на примере Сочинского полигона // *Геоинформатика*. 2018. № 4. С. 59–70.
3. *Дмитриев П. Н., Голубев В. И., Исаев Ю. С., Киселева Е. А., Михайлов В. О., Смольянинова Е. И.* Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
4. *Захаров А. И., Захарова Л. Н., Красногорский М. Г.* Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных угловых отражателей // *Исслед. Земли из космоса*. 2018. № 3. С. 80–92. DOI: 10.7868/S0205961418030065.
5. *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>.
6. *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.
7. *Смольянинова Е. И., Киселева Е. А., Михайлов В. О.* Применение РСА-интерферометрии снимков со спутников Sentinel-1 при изучении областей активных деформаций поверхности в прибрежном районе Большого Сочи // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 147–155. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
8. *Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н.* Изучение и мониторинг зон проседания в Имеретинской низменности (район Большого Сочи) методом РСА-интерферометрии разностотных спутниковых радарных снимков за период 2007–2019 // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 5. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
9. *Смольянинова Е. И., Михайлов В. О., Дмитриев П. Н.* Выявление и мониторинг областей активных деформаций в Адлерском районе Большого Сочи путём анализа серий разностотных 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.
10. *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.
11. *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.
12. *Bondur V., Chimtdorzhiev 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>.
13. *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>.
14. *Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P.* The Role of Satellite In-SAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 3735. <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.

15. 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.
16. 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>.
17. Zhang Y., Meng X. M., Dijkstra T. A. et al. Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques // Remote Sensing of Environment. 2020. V. 241. Article 111738. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111738>.

Analysis of displacements of landslides in the Big Sochi region based on InSAR data: Case study of Sergei Pol'e (Gornaya Polyana settlement)

E. I. Smolyaninova, V. O. Mikhailov

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

Urgency of the research is determined by landslide hazard in the Big Sochi region due to growing anthropogenic effect. The aim of this paper is to demonstrate possibilities of InSAR to study landslide hazard in this region. We present an updated interactive map of surface deformations for the Central and Adler regions of the Big Sochi based on the InSAR Sentinel-1A data from ascending 43A (190 images) and descending 123D (173 images) acquisitions for the period 2015–2023. The map is available at: <https://adler.nextgis.com/resource/879/display?panel=info>. SBAS (Small Baseline Subset) ENVI SARscape v. 5.3 software was used for processing. Mean displacement rates in the satellite line-of-sight direction are shown as layers. Significant active deformation areas are marked off with numbers and time series graphs are displayed. The novelty of the work is calculation of displacement rates down the slope shown as layers on the updated map. Moreover, for case study of Sergei Pol'e landslide (Gornaya Polyana) where landslide failure took place in October 2021 we demonstrate possibilities of InSAR for landslide susceptibility evaluation. Time series graphs in different points of the slope were analyzed together with precipitation data summarized for 1, 3, 5, 15 and 30 days. It was found that in the upper part of the landslide constant displacements up to 200 mm in the satellite line of sight direction with comparatively short deceleration took place prior to the landslide failure. Constant displacements were also revealed on the western slope above the settlement. All those were evidences of landslide susceptibility. It was realized that long stable periods during accumulation of precipitates (incessant rains) in the lower part of the landslide appeared to be the most dangerous. Anomalous accumulated precipitation for the whole 2021 outweighed that for the previous years; it continued to go up since July 2021 and triggered the huge landslide failure on October 5, 2021.

Keywords: SAR, InSAR, satellite monitoring, landslides, interactive map, Sentinel-1A, Big Sochi, s. Sergei-Pol'e

Accepted: 17.04.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-73-83

References

1. Bondur V. G., Zakharova L. N., Zakharov A. I. et al., Long-term monitoring of the landslide process on Bureya riverbank based on interferometric L-band radar data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5. pp. 113–119 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119.
2. 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).
3. Dmitriev P. N., Golubev V. I., Isaev Ju. S., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolyaninova E. I., On processing and interpretation of SAR interferometry data in case of landslide monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 130–142 (in Russian).

4. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorskii M. G., Monitoring of the landslide activity using radar interferometric observations, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 80–92 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030065.
5. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Sinilo V. P., Study of long-term dynamics of the Bureya landslide using spaceborn SAR interferometry, *GeoRisk*, 2022, Vol. 16, No. 3, pp. 20–34 (in Russian), <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-3-20-34>.
6. Mikhailov V. O., Kiseleva E. A., Smol'yaninova 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, *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2014, Vol. 50, No. 4, pp. 576–587, DOI: 10.1134/S1069351314040107.
7. 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, Vol. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-1558.
8. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., Dmitriev P. N., Subsidence monitoring in the Imereti lowland (the Big Sochi region) using multifrequency INSAR data for 2007–2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 103–117 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
9. 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, Vol. 18, No. 4, pp. 55–65 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.
10. Smolyaninova E. I., Mikhailov V. O., 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, Vol. 19, No. 4, pp. 141–149 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149.
11. 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, DOI: 10.1109/TGRS.2002.803792.
12. 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, Vol. 13, No. 24, Article 5136, <https://doi.org/10.3390/rs13245136>.
13. 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, Vol. 216, Article 103574, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574>.
14. Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P., The Role of Satellite In-SAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 3735, <https://doi.org/10.3390/rs13183735>.
15. Notti D., Herrera G., Bianchini S. et al., A methodology for improving landslide PSI data analysis, *Intern. J. Remote Sensing*, 2014, Vol. 35, No. 6, pp. 2186–2214, DOI: 10.1080/01431161.2014.889864.
16. Solari L., Del Soldato M., Raspini F. et al., Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 8, Article 1351, 29 p., <https://doi.org/10.3390/rs12081351>.
17. Zhang Y., Meng X. M., Dijkstra T. A. et al., Forecasting the magnitude of potential landslides based on InSAR techniques, *Remote Sensing of Environment*, 2020, Vol. 241, Article 111738, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111738>.