# 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.

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

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

Представлена интерактивная карта деформаций поверхности для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи, построенная на базе интерферометрической обработки радарных снимков со спутника Sentinel-1А с восходящего 43А (167 снимков) и нисходящего 123D (140 снимков) треков за период 2015-2021 гг. Обработка снимков проводилась методом малых базовых линий (SBAS) в пакете ENVI SARscape v.5.3. Подробно методика расчётов и анализа результатов описана в работах авторов за 2019-2021 гг. Построение карты осуществлялось с использованием ознакомительной версии ПО NextGIS QGIS. В результате интерферометрической обработки снимков для каждого трека были вычислены поля смещений земной поверхности или техногенных объектов в направлении визирования спутника (Ulos) и построены карты средних скоростей смещений Vlos. Результаты представлены на карте в виде соответствующих слоёв Vlos. Участки, где абсолютные значения скоростей Vlos больше 20 мм/ год, — области активных деформаций (ОАД) — показаны в соответствии с направлением смещений относительно спутника красным (от спутника) или синим (к спутнику) цветом. Наиболее значительные ОАД промаркированы, и для них во всплывающих окнах представлены графики временных серий смещений. С кратким описанием характера деформаций, отображённом на графике, можно ознакомиться во вкладке «Атрибуты». В виде отдельного слоя представлены области активных оползневых проявлений по наземным данным ФГБУ «Гидроспецгеология». Показано, что результаты РСА-интерфеометрии и наземных исследований дополняют друг друга. Это обуславливает перспективность совместного использования карт поверхностных деформаций по InSAR и карт оползневых проявлений и оползневой опасности, построенных на базе полевых наблюдений. Предлагаемое наглядное представление результатов РСА-интерферометрии в виде интерактивной карты открывает возможности применения этих карт совместно с любыми ГИС-картами. Для района Большого Сочи с высокой оползневой опасностью и постоянно растущей антропогенной нагрузкой построение комплексных интерактивных карт по данным РСА-интерферометрии и различных наземных методов позволит существенно повысить эффективность мониторинга оползневых процессов, а также областей проседания грунтов. Карта размещена в сети интернет по адресу https:// adler.nextgis.com/resource/591/display?panel=info.

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

Одобрена к печати: 25.07.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149

### Введение

Возможность использования результатов интерферометрической обработки данных спутниковых радаров с синтезированной апертурой (PCA-интерферометрии, *англ*. Interferometric synthetic aperture radar — InSAR) для локализации деформаций земной поверхности (в особенности оползневых участков, а также областей просадок) была показана многими авторами. Обзоры этих работ можно найти, например, в статьях (Crosetto et al., 2016; Mondini et al., 2021; Solari et al., 2020). Кроме выявления областей активных смещений, этот метод используется для уточнения карт оползневых проявлений (*англ*. landslide inventory maps) с последующей оценкой их активности и оползневой опасности (например, (Bianchini et al., 2013; Cigna et al., 2013)). Запуск Европейским космическим агентством (*англ*. European Space Agency — ESA) спутников Sentinel-1 с шестидневным интервалом съёмки значительной части территории Земли и свободным распространением радарных снимков через интернет способствовал дальнейшему развитию этого направления исследований. Снимки с этих спутников активно используются для построения региональных карт оползневых проявлений (см., например, (Rosi et al., 2018; Zinno et al., 2020)). Всё больше публикуется работ, где карты оползневой активности по данным РСА-интерферометрии используются при оценках оползневого риска наряду с картами оползневой опасности, построенными по другим данным (например, (Zhou et al., 2022)). В сети интернет размещаются такие карты на целые регионы (например, на Тихоокеанское побережье созданы электронные ресурсы (Petley, 2020; https://smuinsar. github.io/smuwebsite/SMU PNW InSAR landslide inventory.html)). Разрабатываются подходы для предсказания времени схода оползней по PCA-данным (например, (Moretto et al., 2021)). Во многих странах метод InSAR уже применяется государственными организациями в региональных системах мониторинга окружающей среды, направленными на защиту населения от природных и техногенных воздействий (например, (Solari et al., 2019) и др.). Всё большее значение приобретают визуализация и пост-обработка РСА-данных, т.е. не только построение карт деформаций поверхности в направлении распространения радарного сигнала (LOS – анел. line of sight) за период съёмки, но и представление результатов в виде, удобном для использования различными специалистами, с привлечением данных, полученных разными методами (например, интерактивные карты). В России РСА-интерферометрия в исследовании оползневой опасности применяется не столь широко, хотя работы в этом направлении ведутся (Захаров, Захарова, 2020; Захарова, Захарова, 2019; Захарова и др., 2018; Смольянинова и др., 2019–2021; Bondur et al., 2021). Впервые описываемая в данной статье интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии была представлена на 19-й конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (Смольянинова, Михайлов, 2021). В настоящей работе приводится подробное описание материалов и методики построения этой карты, а также результатов, которые можно получить с её помощью.

# Район исследований и использованные снимки

На территории Большого Сочи оползни наиболее интенсивно проявляются в прибрежной части, в районе распространения терригенных пород палеогена, на участке побережья шириной до 10 км от устья р. Шахе до устья р. Мзымты. Для построения интерактивной карты нами была выбрана область, показанная на *рис. 1*.



*Рис. 1.* Район исследований и расчётные области, покрываемые радарными снимками спутника Sentinel-1A с восходящей (43A) и нисходящей (123D) орбит

Выбранная территория представляется особо благоприятной для применения методов радарной интерферометрии, так как вследствие достаточно плотной застройки здесь имеется много хорошо отражающих радарный сигнал объектов, а сравнительно невысокий и пологий рельеф позволяет минимизировать погрешности цифровой модели рельефа (ЦМР).

Были использованы снимки со спутника Sentinel-1A с восходящего 43A (167 снимков) и нисходящего 123D (140 снимков) треков за период 2015–2021 гг. С целью экономии вычислительных ресурсов расчёты проводились раздельно для Центральной части и Адлерского р-на, для чего из радарных снимков были вырезаны соответствующие, показанные на *рис.* 1, области.

### Технология обработки снимков и построения карты

Интерферометрическая обработка снимков и расчёты полей смещений проводились по методу малых базовых линий (*англ*. Small Baseline — SBAS) (Berardino et al., 2002), реализованном в пакете ENVI SARscape v.5.3.1. Временные базовые линии варьировались от 12 до 36 дней. Фильтрация интерферограмм перед развёрткой фазы осуществлялась фильтром Гольдштейна (значения коэффициентов тах и min соответственно 2,5 и 0,3). При учёте топографической фазы и геокодировании результатов использовалась ЦМР SRTM v.4. Подробно описание методики расчётов и анализа результатов приведено в работах (Смольянинова и др., 2019–2021).

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). Подробное описание платформы NextGIS Web можно найти в работе (Казаков, Киселев, 2021). Для удобства визуального анализа предусмотрена возможность включения/ отключения отдельных слоёв карты, а для одновременного просмотра слоёв они сделаны полупрозрачными. На отдельном слое розовыми контурами показаны области оползневых проявлений по наземным данным (Вожик, 2016). Ознакомительная версия NextGIS QGIS поддерживает построение карт только на подложке OpenStreetMap. Описание карты приведено во вкладке "info".

### Результаты

В результате интерферометрической обработки снимков для каждого трека были вычислены поля смещений земной поверхности или техногенных объектов в направлении визирования спутника (Ulos) и построены карты средних скоростей смещений Vlos. Результаты представлены на карте в виде соответствующих слоёв Vlos для каждой расчётной области (*puc. 2*). На *puc. 2* также представлена шкала скоростей, которая показана во вкладке "info". Средние скорости смещений Vlos, направленные от спутника, считаются отрицательными, а к спутнику — положительными. Следует пояснить, что, поскольку для удобства анализа результатов слои скоростей смещений Vlos сделаны полупрозрачными, цветовая шкала в легенде соответствует отображаемой карте только в случае непересекающихся слоёв без подложки. При отображении слоя скоростей на фоне подложки цвета немного изменяются, а при одновременном отображении слоёв с восходящего и нисходящего треков (как карта отображается по умолчанию) получается смешение цветов.

Участки, где абсолютные значения средних скоростей Vlos больше 20 мм/год, считаются областями активных деформаций (ОАД). Выделено 45 наиболее значительных ОАД. В Имеретинской низменности с плоским рельефом ОАД (голубые незакрашенные круги с номерами), вероятнее всего, обусловлены оседанием грунта, а на склонах (с отличной от нуля топографией) — оползневыми процессами (пронумерованные незакрашенные белые круги). Для промаркированных ОАД в характерных точках, где смещения хорошо регистрируются и с восходящего, и с нисходящего треков (белые кружки с чёрной обводкой), построены

графики временных серий смещений. При щелчке мышью на кружке появляется окно, где во вкладке «Вложения» можно увидеть пиктограммы этих графиков. Щелчок мыши на пиктограмме открывает график на весь экран. Краткое описание области и характера деформаций, отображённых на графике, приводится во вкладке «Атрибуты».



*Puc. 2.* Скриншот карты Vlos для исследуемой области с представленными слоями. Карта размещена по адресу: https://adler.nextgis.com/resource/591/display?panel=info. Пояснения в тексте

### Интерпретация результатов

На *рис. 3* представлен увеличенный фрагмент карты с ОАД, обусловленными как оползневыми процессами (N38), так и оседанием (N4).



*Рис. 3.* Увеличенный участок карты: оползневой участок ОАД N38 (ул. Коммунаров) и область оседаний N4 (Имеретинская низменность): *a* — трек 43А; *б* — трек 123D. Шкала скоростей представлена на *рис. 2.* Розовые контуры — области оползневых проявлений по наземным данным, приведенным в публикации (Вожик, 2016)

Оползневые массы в пределах ОАД N38 (ул. Коммунаров, *puc. 4a*) движутся преимущественно в юго-западном направлении, поэтому смещения в направлении LOS, зарегистрированные с восходящей орбиты (сплошная линия), — положительные (направлены к спутнику), а смещения, полученные с нисходящей орбиты (пунктир), — отрицательные. В отличие от этого область оседаний в Имеретинской низменности N4 выглядит одинаково и с восходящего, и с нисходящего треков (*puc. 46*). Это означает, что смещения здесь практически полностью вертикальные.



Рис. 4. Графики временных серий смещений за 2015–2021 гг. для оползневого участка в районе ул. Коммунаров ОАД N38 (*a*) и области оседания в Имеретинской низменности ОАД N4 (*б*)

Подчеркнём, что на графиках временных серий смещения представлены в направлении LOS. Значение смещения вниз по склону может быть оценено исходя из геометрии съёмки, а также по экспозиции склона и углу его наклона, которые можно рассчитать по ЦМР (Дмитриев и др., 2012). В некоторых случаях оно может отличаться от представленного на графике значения в несколько раз.

На карте хорошо видно, что в подавляющем большинстве случаев интерферометрические данные покрывают территории, где имеются хорошо отражающие радарный сигнал здания и сооружения, в то время как области оползневых проявлений по наземным данным (розовые контуры по данным ФГБУ «Гидроспецгеология» (Вожик, 2016)) зафиксированы в основном на незастроенных участках. Этот факт был отмечен и проанализирован в работе (Смольянинова и др., 2019). Суть в том, что РСА-интерферометрия хорошо фиксирует небольшие деформации на участках без растительности и особенно в условиях характерной для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи плотной индивидуальной застройки, где крыши домов становятся прекрасными отражателями радарного сигнала. Наземные обследования в большинстве случаев учитывают проявления оползневых процессов (трещины, бровки отрыва, бугры, «пьяный лес» и т.п.), видимые именно на незастроенной территории и при активном развитии оползня. Участки, подверженные значительному воздействию оползневых процессов, обычно стараются не застраивать, и они покрыты растительностью. Таким образом, 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.

Следует отметить, что на представленной карте отмечены только медленные оползни и просадки, скорости смещений для которых не превышают 200 мм/год. Кроме того, необходимо также учитывать, что некоторые участки поверхности могут быть не видны, так как спутниковый РСА — локатор бокового обзора и на снимках в горной местности существуют зоны тени и наложения изображений. В ряде случаев возможно уточнение границ оползневых участков при привлечении снимков с других треков (145А и 21D), на которых визирование поверхности выполнялось под другими углами.

#### Выводы

Интерактивная карта деформаций поверхности по данным InSAR для района Большого Сочи размещена в сети интернет по адресу: https://adler.nextgis.com/resource/591/display?panel=info. На карте отмечено 38 наиболее значительных ОАД, обусловленных оползневыми процессами, и 7 областей проседания в Имеретинской низменности. Во всплывающих окнах для этих областей приведены графики временных серий смещений, которые позволяют анализировать динамику деформаций.

Совместный анализ представленной карты поверхностных деформаций по PCA-интерферометрии и карт оползневых проявлений, построенных на базе полевых наблюдений, позволяет повысить эффективность мониторинга оползневых процессов в прибрежной части Большого Сочи. Обновление карты целесообразно производить раз в полгода. За этот срок происходят хорошо идентифицируемые методами PCA-интерферометрии деформации.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0144-2019-0016 Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.

# Литература

- 1. Вожик А.А. Оценка экзогенной геологической опасности при ведении государственного мониторинга состояния недр // 8-й Всерос. съезд геологов. 26–28 окт. 2016 г., Москва: презентац. материалы круглого стола «Гос. мониторинг состояния недр и регион. гидрогеол. работы». http://www. specgeo.ru/pdf/doklad viii geolog 04.pdf (дата обращения 20.05.2021).
- 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. Долговременный мониторинг зоны Бурейского оползня методами радарной интерферометрии // Материалы 18-й Всерос. открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 16–20 нояб. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 285. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- 4. Захаров А.И., Захарова Л.Н., Красногорский М.Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголковых отражателей // Исслед. Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92. DOI: 10.7868/S0205961418030065.
- 5. Захарова Л. Н., Захаров А. И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурея по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
- 6. *Казаков Э. Э., Киселёв Р.В.* Платформа NextGIS: комплексное решение для инфраструктуры пространственных данных предприятия // Геопрофи. 2021. № 6. С. 11–15. URL: http://www.geoprofi. ru/technology/platforma-nextgis-kompleksnoe-reshenie-dlya-infrastrukturyh-prostranstvennyhkh-dannyhkh-predpriyatiya.
- Смольянинова Е. И., Михайлов В. О. Интерактивная карта активных оползневых участков и зон проседания грунтов для Центрального и Адлерского районов Большого Сочи по данным спутниковой радарной интерферометрии // Материалы 19-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 15–19 нояб. 2021. М.: ИКИ РАН, 2021. С. 111. DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
- 8. 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.
- 9. Смольянинова Е.И., Михайлов В.О., Дмитриев П. Н. Изучение и мониторинг зон проседания в Имеретинской низменности (район Большого Сочи) методом РСА-интерферометрии разночастотных спутниковых радарных снимков за период 2007–2019 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 103–111. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.
- 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 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.

- 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.
- Bianchini S., Herrera G., Mateos R., Notti D., Garcia I., Mora O., Moretti S. Landslide activity maps generation by means of Persistent Scatterer Interferometry // Remote Sensing. 2013. V. 5. P. 6198–6222. https://doi.org/10.3390/rs5126198.
- 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. Art. No. 5136. 20 p. https://doi.org/10.3390/rs13245136.
- 14. *Cigna F., Bianchini S., Casagli N.* How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): The PSI-based matrix approach // Landslides. 2013. V. 10. P. 267–283. https://doi.org/10.1007/s10346-012-0335-7.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B. Persistent Scatterer Interferometry: A review // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 115. P. 78–89. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
- Mondini A., Guzzetti F., Chang K.-T., Monserrat O., Martha T. R., Manconi A. Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future // Earth-Science Reviews. 2021. V. 216. Art. No. 103574. 33 p. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574.
- 17. *Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P.* The Role of Satellite In-SAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings // Remote Sensing. 2021. V. 13. Art. No. 3735. 33 p. https://doi.org/10.3390/rs13183735.
- 18. *Petley D.* Using InSAR to create a landslide inventory for the Pacific Northwest // The Landslide Blog. 1 Oct. 2021. URL: https://blogs.agu.org/landslideblog/2021/10/01/using-insar-to-create-a-landslide-inventory-for-the-pacific-northwest (accessed 27.03.2022).
- 19. Rosi A., Tofani V., Tanteri L., Tacconi Stefanelli C., Agostini A., Catani F., Casagli N. The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution // Landslides. 2018. V. 15. P. 5–19. DOI: 10.1007/s10346-017-0861-4.
- Solari L., Del Soldato M., Montalti R., Bianchini S., Raspini F., Thuegaz P., Bertolo D., Tofani V., Casagli N. A Sentinel-1 based hot-spot analysis: landslide mapping in northwestern Italy // Intern. J. Remote Sensing. 2019. V. 40. No. 20. P. 7898–7921. DOI: 10.1080/01431161.2019.1607612.
- 21. Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M. Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 8. Art. No. 1351. 29 p. https://doi.org/10.3390/rs12081351.
- Zhou S., Ouyang C., Huang Y. An InSAR and depth-integrated coupled model for potential landslide hazard assessment // Acta Geotechnica. 2022. V. 17. P. 3613–3632. https://doi.org/10.1007/ s11440-021-01429-w.
- Zinno I., Bonano M., Buonanno S., Casu F., De Luca C., Manunta M., Manzo M., Lanari R. National Scale Surface Deformation Time Series Generation through Advanced DInSAR Processing of Sentinel-1 Data within a Cloud Computing Environment // IEEE Trans. Big Data. 2020. V. 6. No. 3. P. 558–571. DOI: 10.1109/TBDATA.2018.2863558.

# 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

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

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

We present an interactive map of surface deformations for the Central and Adler regions of the Big Sochi area based on the InSAR Sentinel-1A data from ascending 43A (167 images) and descending 123D (140 images) acquisitions for the period 2015–2021. SBAS ENVI SARScape v.5.3 software was used for processing. Methods of calculations and analysis of results are described in detail in 2019–

2021. Evaluation version of the NextGIS QGIS software was incorporated for mapping. In the end of the InSAR processing displacements of the Earth's surface and buildings in the satellite line of site direction (Ulos) were calculated and the mean displacement rates Vlos were mapped. The results are presented on the map as Vlos layers. Areas where absolute values of Vlos exceed 20 mm/Y are considered as Active Deformation Areas (ADA) and shown according to the direction of movements in red (from satellite) or blue (towards satellite). The most significant ADA are marked with numbers, and times series graphs of displacements for them are presented in popup windows. Brief interpretation of deformation character pictured in time series graphs can be found in Attributes tab. There is also a specific layer containing active landslide occurrences mapped in accordance with field data of FGBU Gidrospecgeologia. It was shown that InSAR and field data complement each other. This motivates joint usage of InSAR surface deformation maps together with landslides risk assessment maps based on field data. The presented visualization of InSAR data as an interactive map opens possibilities for complex use of InSAR data together with other GIS maps. In the Big Sochi area having high landslide risk and constant growing of man-made load, interactive maps based on InSAR and various field data make it possible to considerably improve the existing monitoring systems of landslides and areas of subsidence. The map is available at: https://adler.nextgis.com/resource/591/display?panel=info.

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

Accepted: 25.07.2022 DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-4-141-149

### References

- Vozhik A. A., Risk assessment of exogenetic geological processes in the course of state monitoring of the state of the subsurface, 8s<sup>th</sup> Vserossiiskii s"ezd geologov 26–28 oktyabrya 2016 g. Prezentatsionnye materially kruglogo stola "Gosudarstvennyi monitoring sostoyaniya nedr i regional'nye gidrogeologicheskie raboty" (8<sup>th</sup> All-Russia Congress of Geologists 26–28 October 2016. Presentations of the round table meeting "State monitoring of the state of the subsurface and regional hydrogeological projects"), Moscow, 2016, 71 p., available at: http://www.specgeo.ru/pdf/doklad\_viii\_geolog\_04.pdf (accessed 20.05.2021) (in Russian).
- 2. Dmitriev P. N., Golubev V. I., Isaev Yu. S., Kiseleva E. A., Mikhailov V. O., Smolianinova 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).
- Zakharov A. I., Zakharova L. N., Long-term monitoring of the Bureya Landslide area by Radar Interferometry, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*(Proc. 18<sup>th</sup> All-Russia Open Conf."Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 16–20 Nov. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, p. 285 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
- 4. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorskii M. G., Monitoring Landslide Activity by Radar Interferometry Using Trihedral Corner Reflectors, *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, No. 3, pp. 80–92 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961418030065.
- 5. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Interferometric Observation of Landslide Area Dynamics on the Bureya River by Means of Sentinel-1 Radar Data in 2017–2018, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277.
- 6. Kazakov E. E., Kiselev R. V., NextGIS platform: a complex solution for enterprise spatial data infrastructure, *Geoprofi*, 2021, No. 6, pp. 11–15 (in Russian), available at: http://www.geoprofi.ru/technology/platforma-nextgis-kompleksnoe-reshenie-dlya-infrastrukturyh-prostranstvennyhkh-dannyhkh-predpriyatiya.
- Smolianinova 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, *Materialy 19-i mezhdunaronoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 19<sup>th</sup> Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 15–19 Nov. 2021, Moscow: IKI RAN, 2021, p. 111 (in Russian), DOI: 10.21046/19DZZconf-2021a.
- Smolianinova E. I., Kiseleva E. A., Mikhailov V.O., Sentinel-1 InSAR for Investigation of Active Deformation Areas: Case Study of the coastal region of the Big Sochi, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 5, pp. 147–155 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-147-155.
- 9. Smolianinova E. I., Mikhailov V.O., Dmitriev P. N., Subsidence monitoring in the Imereti lowland (the Big Sochi region) using multifrequency INSAR data for 2007–2019, *Sovremennye problemy*

*distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 103–117 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-103-113.

- 10. Smolianinova 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, DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-55-65.
- 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. Bianchini S., Herrera G., Mateos R., Notti D., Garcia I., Mora O., Moretti S., Landslide activity maps generation by means of Persistent Scatterer Interferometry, *Remote Sensing*, 2013, Vol. 5, pp. 6198–6222, https://doi.org/10.3390/rs5126198.
- 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, Vol. 13, No. 24, Art. No. 5136, 20 p., https://doi.org/10.3390/rs13245136.
- 14. Cigna F., Bianchini S., Casagli N., How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): The PSI-based matrix approach, *Landslides*, 2013, Vol. 10, pp. 267–283, https://doi.org/10.1007/s10346-012-0335-7.
- Crosetto M., Monserrat O., Cuevas-González M., Devanthéry N., Crippa B., Persistent Scatterer Interferometry: A review, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, Vol. 115, pp. 78–89, https:// doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.10.011.
- Mondini A., Guzzetti F., Chang K.-T., Monserrat O., Martha T. R., Manconi A., Landslide failures detection and mapping using Synthetic Aperture Radar: Past, present and future, *Earth-Science Reviews*, 2021, Vol. 216, Art. No. 103574, 33 p., https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103574.
- 17. Moretto S., Bozzano F., Mazzanti P., The Role of Satellite In-SAR for Landslide Forecasting: Limitations and Openings, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Art. No. 3735, 33 p., https://doi.org/10.3390/rs13183735.
- 18. Petley D., Using InSAR to create a landslide inventory for the Pacific Northwest, *The Landslide Blog*, 1 Oct. 2021, available at: https://blogs.agu.org/landslideblog/2021/10/01/using-insar-to-create-a-land-slide-inventory-for-the-pacific-northwest (accessed 27.03.2022).
- Rosi A., Tofani V., Tanteri L., Tacconi Stefanelli C., Agostini A., Catani F., Casagli N., The new landslide inventory of Tuscany (Italy) updated with PS-InSAR: geomorphological features and landslide distribution, *Landslides*, 2018, Vol. 15, pp. 5–19, DOI: 10.1007/s10346-017-0861-4.
- Solari L., Del Soldato M., Montalti R., Bianchini S., Raspini F., Thuegaz P., Bertolo D., Tofani V., Casagli N., A Sentinel-1 based hot-spot analysis: landslide mapping in northwestern Italy, *Intern. J. Remote Sensing*, 2019, Vol. 40, No. 20, pp. 7898–7921, DOI: 10.1080/01431161.2019.1607612.
- Solari L., Del Soldato M., Raspini F., Barra A., Bianchini S., Confuorto P., Casagli N., Crosetto M., Review of Satellite Interferometry for Landslide Detection in Italy, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 8, Art. No. 1351, 29 p., https://doi.org/10.3390/rs12081351.
- Zhou S., Ouyang C., Huang Y., An InSAR and depth-integrated coupled model for potential landslide hazard assessment, *Acta Geotechnica*, 2022, Vol. 17, pp. 3613–3632, https://doi.org/10.1007/ s11440-021-01429-w.
- 23. Zinno I., Bonano M., Buonanno S., Casu F., De Luca C., Manunta M., Manzo M., Lanari R., National Scale Surface Deformation Time Series Generation through Advanced DInSAR Processing of Sentinel-1 Data within a Cloud Computing Environment, *IEEE Trans. Big Data*, 2020, Vol. 6, No. 3, pp. 558–571, DOI: 10.1109/TBDATA.2018.2863558.