

## **Новая активная оползневая зона на берегу реки Буреи по данным радарной интерферометрии спутника ALOS-2**

Л.Н. Захарова, А.И. Захаров

*Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал 141190, г. Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1  
E-mail: [aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru](mailto:aizakhar@sunclass.ire.rssi.ru)*

*По результатам интерферометрической обработки пары снимков радара с синтезированной апертурой (РСА) L-диапазона PALSAR-2, сделанных по территории Бурейского оползня в мае 2019 и мае 2020 гг. со спутника ALOS-2, обнаружена новая нестабильная область поверхности. Эта покрытая лесом область размером 150 на 300 м расположена выше оползневой чаши, сформировавшейся в результате обрушения оползневого склона в 2018 году. Среднегодовая скорость смещения грунта вдоль поверхности склона в месте формирования новой стенки отрыва в 2019 году равна примерно 1 см/мес. Материалы интерферометрической обработки архивных данных не выявляли ранее каких-либо подвижек поверхности склона в этом месте. Наиболее вероятной причиной активизации оползневого процесса на новом участке является сход в декабре 2018 года нижележащего тела оползня. Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, дифференциальная интерферометрия, цифровая модель рельефа, оползень, река Бурея*

## **New active landslide area on the of the Bureya riverbank according to radar interferometry data from the ALOS-2 satellite**

L.N. Zakharova, A.I. Zakharov

*Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino branch*

*New unstable territory in the area of the Bureya landslide was discovered as a result of interferometric processing and analysis of the L-band synthetic aperture radar PALSAR-2 images acquired in May 2019 and May 2020 from ALOS-2 satellite. This forested area 150 by 300 meters in size is located above the landslide bowl that was formed after the December 2018 landfall. Average annual velocity of the surface displacements along the riverbank slope near the area of the incipient rupture wall in 2019 was about 1 cm/month. Interferometric processing of earlier datasets, acquired before the landfall, did not confirm any soil displacements of the territory under discussion. The most likely reason of the activation of the new landslide process is a failure of the landslide body down the slope in December 2018.*

*Keywords: synthetic aperture radar, differential SAR interferometry, digital elevation model, landslide, the Bureya river*

Радиолокационная интерферометрия является ценным информативным инструментом мониторинга опасных техногенных и природных явлений, позволяя выявлять и наблюдать мелкомасштабные нежелательные деформации отражающих покровов. Изучение подобных явлений, истории развития опасных процессов очень важны для безопасного проживания и сохранности промышленной и жилой инфраструктуры на близлежащих территориях. По своим масштабам Бурейский оползень 2018 года относится к категории грандиозных оползней — по данным наземных измерений, подтверждающихся результатами обработки космических снимков, длина оползня около 800 м, ширина 400 м, а объём сошедшего грунта составил ~19 млн м<sup>3</sup>. Последствием образования запруды стало нарастание уровня

воды в реке, грозившее подтоплением населенных пунктов выше по течению, а также создавало угрозу Бурейской ГЭС из-за возможного прорыва запруды весной. Для восстановления в реке водотока сквозь слой оползневых скальных пород в период с 22 января по 1 февраля 2019 г. силами Министерства обороны РФ была проведена серия взрывов, после чего удалось сформировать протоку, обеспечившую снижение уровня воды в реке выше запруды.

В серии работ [1-5] благодаря обработке архивных радиолокационных снимков методом радарной интерферометрии удалось прояснить историю развития в начале 21 века оползневого процесса на реке Бурее. На первом этапе были использованы данные спутников Sentinel-1 (радар С-диапазона, длина волны 5.6 см). Выявлено, что подвижки грунта оползневого склона имели место по крайней мере за два года до обрушения склона [1]. По данным этого же спутника сделано заключение о стабильности оползневой зоны зимой 2019 года, сразу после схода оползня [2]. В частности, не было выявлено достоверных подвижек поверхности оползневой чаши, которые могли быть спровоцированы взрывными работами по пробивке канала в оползневой перемычке в последнюю декаду января 2019 г.

Далее, по результатам обработки доступных архивных снимков спутников ALOS-1 и ALOS-2 (радары L-диапазона, длина волны 23 см) оказалось возможным наблюдать развитие динамики оползневого процесса, начиная с 2006 года [3,4]. В работе [5] по итогам совместного анализа данных радиолокационной интерферометрии, высокодетальных цифровых моделей рельефа и метеорологической информации наземной метеостанции изложены возможные причины активации оползня и развития его динамики с 2006 до начала 2018 года.

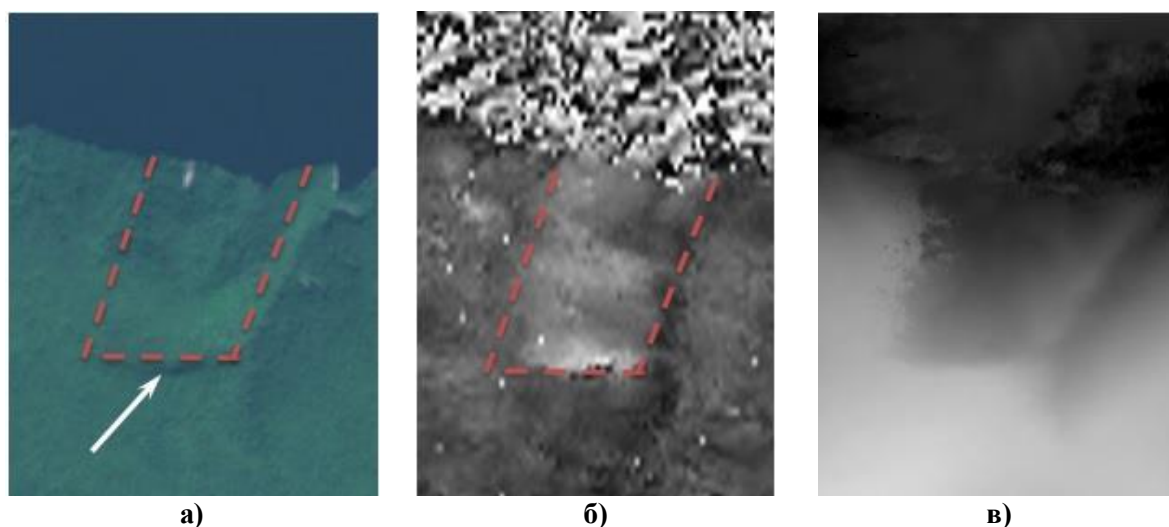
Вопросу исследования стабильности поверхности оползневой чаши и окружающей территории по радарным данным после события декабря 2018 года также уделялось внимание в ряде отечественных работ. В работе [6] с помощью метода классической дифференциальной интерферограммы показано, что поверхность чаши оползня после обвала была в целом стабильна вплоть до осени 2019 года. Однако из-за ограничений применимости данных С-диапазона (высокой временной декорреляции сигналов) наблюдать возможную динамику залесенных участков поверхности, примыкающих к оползневой чаше, оказалось невозможно. В работе [7] проведена обработка большой серии радиолокационных снимков спутника Sentinel-1 за 2019-2020 гг. по участку оползня методом постоянных отражателей, благодаря чему выявлены точечные стабильно отражающие объекты, расположенные на безлесных участках поверхности — оползневой чаше, земляной запруде в русле реки, прибрежных участках в устье реки Средний Сандар, — и построены графики возможных смещений этих объектов за два года.

В настоящей работе для выявления динамики покрытой лесом территории вблизи оползневой чаши использована пара снимков японского радара PALSAR-2, сделанных в мае 2019 и 2020 гг. Как показано в [3,4], особенностью зондирования в L-диапазоне является повышенная стабильность отражения, благодаря чему на дифференциальной интерферограмме удалось выявить подвижки не только безлесных, но и залесенных участков поверхности, накопленные за год между съемками.

Судя по интерферограмме лета 2016 года, долгое время развитие оползневого процесса происходило в пределах участка, обведённого на оптическом изображении на рис. 1а) красной линией. На этом изображении покрытого лесом берегового склона представлена ситуация до обрушения оползня. Размеры участка на снимке 800×1200 м. Высота рельефа меняется от нижнего южного края фрагмента до берега реки в верхней части на 400 м. Стенка отрыва оползня в 2018 году пройдет впоследствии вдоль темной горизонтальной полосы, ложбины, отмеченной стрелкой. На рис. 1б) приведен

фрагмент интерферограммы, построенной по данным ALOS-2 и охватывающей 28-дневный интервал времени летом 2016 года. Более светлые тона на интерферограмме указывают на подвижные участки поверхности. По разности фаз сигналов поверхности в пределах и вне оползня можно утверждать, что летом 2016 года скорость подвижек составляла около 6 см в месяц.

На рис.1в) приведён фрагмент цифровой модели рельефа, построенной с учётом изменений после схода оползневых масс по результатам радиолокационной съемки спутниковой группировкой TanDEM-X в 2020 году. Локальное понижение рельефа в месте нахождения чаши оползня выглядит на рис. 1в) темным пятном, повторяющим красный контур оползня с рис. 1а). Как видно, границы схода оползня совпадают с границами нестабильной области поверхности, выявленной на интерферограмме от 2016 года (светлая область). Заметим, что область подвижек не выходит за рамки оползневой зоны, отмеченной на рис.1а).

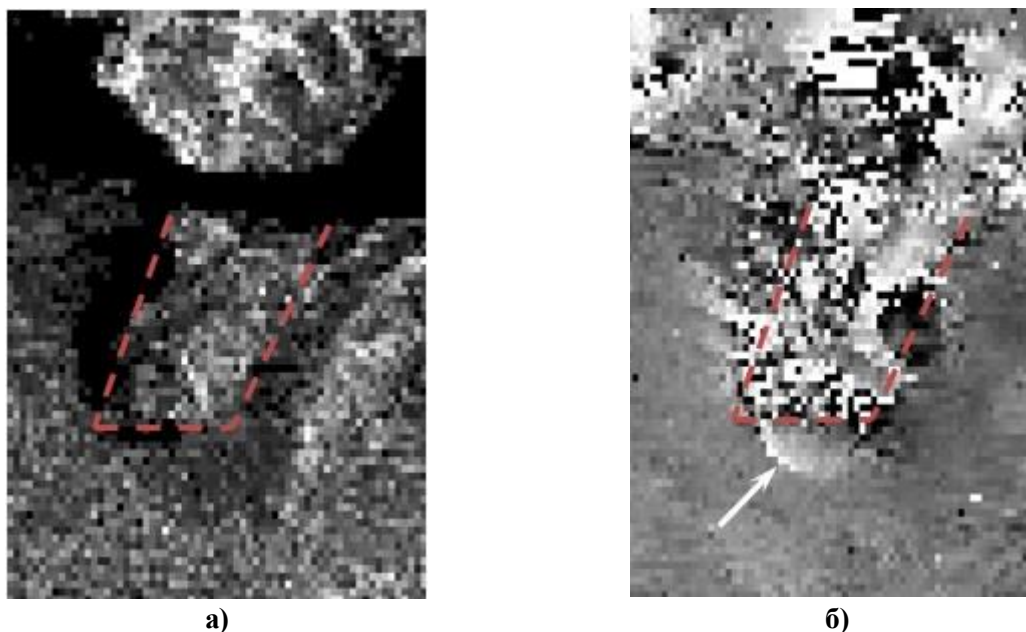


**Рис. 1. Фрагменты изображений: а) – оптического, б) – интерферограммы до схода оползня, в) – цифровой модели рельефа после схода оползня**

Новые сведения о динамике оползневого склона, полученные по данным интерферограммы 2019-2020 годов, говорят о том, что несмотря на глобальную стабильность поверхности оползневой чаши, образовался новый участок нестабильности, расположенный на склоне выше стенки отрыва.

На рисунке 2) приведены радиолокационное изображение и интерферограмма, характеризующие состояние оползневого склона в 2019-2020 годах. Оползневая чаша на рис. 2а) околтурена линией красного цвета. Пестрая картина в пределах чаши может быть объяснена неоднократными локальными обрушениями грунта со стенок чаши, из-за чего также нарушена когерентность отражения сигналов поверхностью чаши. Новая деталь на интерферограмме — светлый сегмент, отмеченный стрелкой на рис. 2б), — это активизировавшийся оползень, размер которого поперек склона составляет около 300 м, а вдоль склона около 150 м.

Новый активный оползневый участок находится на склоне на высоте ~400 м выше береговой линии с уклоном рельефа 30°. Среднемесячная скорость смещений в верхней части сегмента в 2019 году составляет около 1 см (в пересчёте с измеренных 12 см/год; следует при этом отметить, что со сменой времён года скорости смещений меняются, поэтому указанный 1 см/мес — только усреднённая оценка). Наибольшая скорость смещений зафиксирована вверху, в месте формирования новой стенки отрыва (наиболее светлый тон, на который указывает белая стрелка на рис. 2б).



**Рис. 2. Фрагменты изображений по результатам съемки ALOS-2 в мае 2019 и 2020 годов: а) – амплитудного, б) – фазового (интерферограммы)**

На этом участке никогда ранее, до события декабря 2018 года, не было замечено каких-либо мелкомасштабных подвижек. Наиболее вероятной причиной его активизации является исчезновение опоры в виде сошедшего оползневой слоя. Можно предположить, что новый оползневый процесс продолжит развиваться далее и закончится новым крупным сходом оползневой массы. Учитывая, что ширина прорана в реке у подошвы оползня составляет около 150 м, велика вероятность его перекрытия оползневыми массами и возникновения новой чрезвычайной ситуации в виде подтопления населенных пунктов. Эта новая опасная оползневая зона требует безотлагательного регулярного мониторинга, в первую очередь радиолокационными средствами наблюдения, в том числе с помощью перспективного радиолокатора Кондор-ФКА, запуск которого намечен в ближайшее время.

Авторы выражают благодарность Японскому Аэрокосмическому Агентству JAXA за предоставленные архивные данные съёмок радиолокатором PALSAR-2.

*Работа выполнена в рамках государственного задания ИПЭ им. В.А.Котельникова РАН.*

### **Литература**

1. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Наблюдение динамики зоны оползня на реке Буряя по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг.// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 16 № 2, 2019, С. 273-277.
2. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Буряя по данным Sentinel-1// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 16. № 2. 2019, С. 69–74.
3. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Долговременный мониторинг оползневой массы на берегу реки Буряя по данным интерферометрической съёмки радаров L-диапазона// Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, Т. 16, № 5, 2019, с. 113-119.

4. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Возможности наблюдения оползневых процессов с помощью интерферометрической съемки радарми L-диапазона на примере реки Бурея// Исследование Земли из космоса, № 5, 2019, с. 3-14.
5. Zakharov A., Zakharova L. The Bureya Landslide Recent Evolution According to Spaceborne SAR Interferometry Data. Remote Sens. 2022, 14, 5218.
6. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Мониторинг состояния оползневой зоны на реке Бурея в 2018-2019 годах по радиолокационным и оптическим космическим изображениям // Исследование Земли из космоса, № 6, 2019, с. 41-50.
7. 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 Sens. 2021, 13, 5136.