

АКТИВИЗАЦИЯ НОВОГО ОПОЛЗНЕВОГО ПРОЦЕССА НА БУРЕЕ ПО ДАННЫМ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ РАДАРНОМ PALSAR-2

© 2023 г. Л. Н. Захарова^а *, А. И. Захаров^а, С. А. Никитов^б

^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
пл. Введенского, 1, Фрязино Московской обл., 141190 Российская Федерация

^б Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
ул. Моховая, 11, стр. 7, Москва, 125009 Российская Федерация

*E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

Поступила в редакцию 22.05.2023 г.

После доработки 24.05.2023 г.

Принята к публикации 25.05.2023 г.

По результатам обработки интерферометрической 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. Оценена среднемесячная скорость смещения грунта до 1 см/мес вдоль поверхности склона в месте формирования новой стенки отрыва. Отмечено, что материалы интерферометрической обработки архивных данных не выявили ранее каких-либо подвижек поверхности склона в этом месте. Названа наиболее возможная причина активизации оползневой поверхности на новом участке: нарушение устойчивости в результате схода в декабре 2018 г. нижележащего тела оползня.

DOI: 10.31857/S0033849423090280, EDN: RIGLGX

ВВЕДЕНИЕ

Радиолокационная интерферометрия [1, 2] является ценным информативным инструментом мониторинга опасных техногенных и природных явлений, поскольку позволяет выявлять и наблюдать мелкомасштабные нежелательные деформации отражающих покровов. Эту методику уже три десятилетия применяют для наблюдения ледников [3], оценки стабильности транспортной инфраструктуры в связи с мерзлотными процессами [4], а также оценки смещений поверхности в результате землетрясений [5], оползней [6] или просадок, связанных с выемкой полезных ископаемых или строительством метро [7, 8]. Изучение подобных явлений и истории их развития очень важны для безопасного проживания и сохранности промышленной и жилой инфраструктуры на близлежащих территориях.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ

По своим масштабам Бурейский оползень 2018 г. относится к категории грандиозных оползней: по данным модельных [9] и наземных измерений [10], подтвержденных результатами обработки космических снимков [11], длина оползня около

800 м, ширина 400 м, а объем сошедшего в русло реки Бурейя грунта составил ~19 млн м³. 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 водотока в реке 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 [11–15] благодаря обработке архивных радиолокационных снимков методом радарной интерферометрии удалось прояснить историю развития в начале XXI в. оползневой поверхности на реке Бурей. На первом этапе изучения оползня были использованы данные спутников Sentinel-1 (радар С-диапазона, длина волны 5.6 см). Выявлено, что подвижки грунта оползневой зоны имели место по крайней мере за два года до обрушения склона [12]. По данным этого же спутника сделано заключение о стабильности оползневой зоны зимой 2019 г., сразу после схода оползня [11]. В частности, не было выявлено достоверных подвижек поверхности оползневой зоны, которые

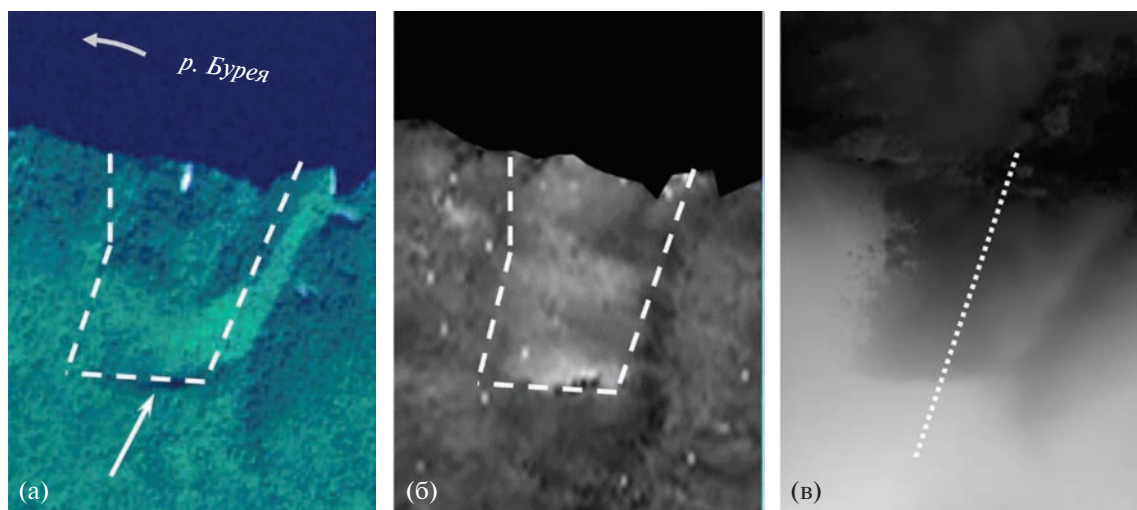


Рис. 1. Оптическое изображение (а) и интерферограмма (б) до схода оползня (область оползня обозначена штриховой линией) и цифровая модель рельефа (в) после схода оползня (пунктиром отмечено положение профиля высот, приведенного далее на рис. 3); стрелка в нижней части рис. (а) указывает положение будущей стенки отрыва.

могли быть спровоцированы взрывными работами по пробивке канала в оползневой перемычке в последнюю декаду января 2019 г. Особенностью измерений по покрытым лесом и кустарником участкам поверхности в С-диапазоне была довольно быстрая потеря когерентности отраженных сигналов, вследствие чего надежные измерения оказались возможны только в холодное время года в короткие интервалы времени между съемками (12 дней, редко 24 дня).

Дальнейшее исследование развития динамики оползневого процесса в период с 2006 по 2017 гг. было выполнено в результате обработки доступных архивных снимков спутников ALOS-1 и ALOS-2 (радары L-диапазона, длина волны 23 см) [13, 14]. Было выявлено, что средняя скорость смещений поверхности увеличивается от малозаметных, около 1 см/мес, в начале периода наблюдения до 6...7 см/мес в его конце. В работе [15] по итогам совместного анализа данных радиолокационной интерферометрии, высокодетальных цифровых моделей рельефа и метеорологической информации наземной метеостанции изложены возможные причины активизации оползневого процесса и развития его динамики с 2006 до начала 2018 г.

Вопросу исследования стабильности поверхности оползневой чаши и окружающей территории по радарным данным после события декабря 2018 г. уделялось внимание в нескольких отечественных работах. В работе [16] с помощью метода классической дифференциальной интерферограммы показано, что поверхность чаши оползня после обвала была в целом стабильна вплоть до осени 2019 г. Однако из-за ограничений применимости данных С-диапазона (высокой временной декорреляции сигналов в теплое время года) на-

блюдать возможную динамику покрытых лесом участков поверхности, примыкающих к оползневой чаше, оказалось невозможно. В работе [17] 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 предположительных смещений соответствующих деталей поверхности за два года.

Судя по интерферограмме, построенной на базе летней интерферометрической пары снимков 2016 г., развитие оползневого процесса вплоть до момента обрушения склона в декабре 2018 г. происходило в пределах участка, обведенного на оптическом изображении на рис. 1а белой штриховой линией. На этом изображении берегового склона, покрытого лесом, штриховой линией отмечены границы будущего оползневого цирка. Размеры фрагмента на рис. 1 составляют 800×1200 м. Высота рельефа меняется от нижнего (южного) края фрагмента до берега реки в верхней части на 400 м. Стенка отрыва оползня 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 г. для той же территории. Фаза на поверхности реки в верхней части интерферограммы, представляющая собой неинформативный шум, для удобства визуального восприятия маскирована черным цветом. Более светлые тона на интерферограмме соответствуют

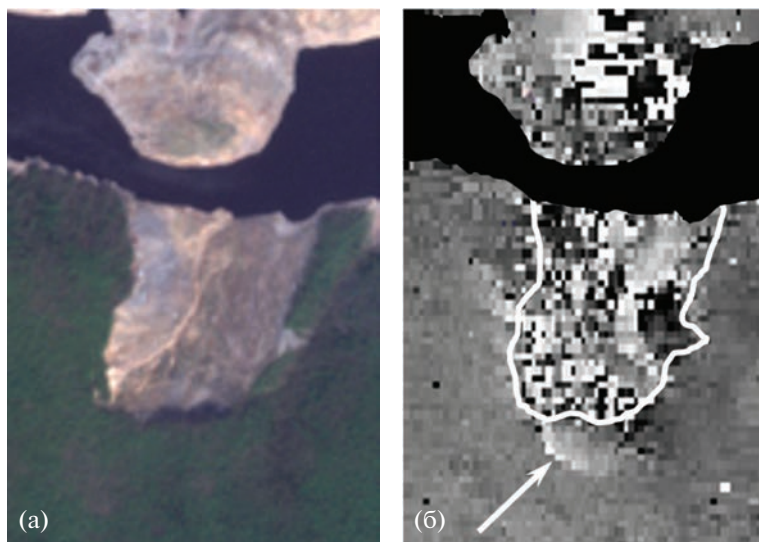


Рис. 2. Фрагменты изображений, полученных в 2019–2020 гг. после схода оползня: а) оптическое Sentinel-2; б) интерферограмма.

подвижным участки поверхности оползневого склона. По разности фаз сигналов поверхности в пределах и вне оползня можно утверждать, что летом 2016 г. скорость подвижек составляла до 6 см в месяц.

На рис. 1в приведен фрагмент цифровой модели рельефа, построенной с учетом изменений после схода оползневых масс по результатам радиолокационной съемки спутниковой группировкой TanDEM-X в 2020 г. Локальное понижение рельефа в месте нахождения чаши оползня выглядит на рис. 1в темным пятном с почти прямыми краями. Границы сформировавшейся оползневой чаши на рис. 1в близки к границам нестабильной области поверхности, выявленной на интерферограмме 2016 г. на рис. 1б (отмечена штриховой линией). Следует обратить внимание на то, что область подвижек поверхности не выходит в своей южной части за рамки оползневой зоны, отмеченной на рис. 1б.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ

В данной работе для выявления динамики покрытой лесом территории вблизи оползневой чаши использована интерферометрическая пара снимков японского радара PALSAR-2, сделанных в мае 2019 и 2020 гг. Как отмечено в [13, 14], особенностью зондирования в L-диапазоне является повышенная стабильность отражений, благодаря чему на дифференциальной интерферограмме стали возможны измерения подвижек не только безлесных, но и покрытых лесом участков поверхности, которые могли произойти за год между съемками. Новые данные о динамике оползневого склона, полученные с помощью интерферограмм

мы 2019–2020 гг., свидетельствуют о том, что несмотря на общую относительную стабильность поверхности оползневой чаши, образовался новый участок нестабильности, расположенный на склоне выше стенки отрыва оползня.

На рис. 2 приведены оптическое изображение и интерферограмма, характеризующие состояние оползневого склона в 2019–2020 гг. Оползневая чаша на рис. 2а хорошо заметна на фоне окружающей покрытой лесом поверхности. Такой же песочный цвет, как и чаша оползня, имеет на рис. 2а образовавшаяся после схода оползня насыпь посреди русла реки. Свободная часть русла реки (проран) проходит непосредственно у подножия оползневого склона. Пестрая картина на интерферограмме в пределах чаши и на насыпи может быть объяснена неоднократными небольшими обрушениями грунта, из-за чего нарушается когерентность отражения сигналов поверхностью. Новая деталь на интерферограмме рис. 2б – светлый сегмент, отмеченный стрелкой, – это активизировавшийся оползень, размер которого поперек склона (с запада на восток) составляет около 300 м, а вдоль склона (с севера на юг) около 150 м. Расположение подвижного участка непосредственно над стенкой отрыва создает угрозу его обрушения. Еще одна деталь на интерферограмме (рис. 2б), связанная с динамикой поверхности, расположена внутри контура уже сошедшего оползня. В западной части чаши в связи с низкой когерентностью интерферометрия не может предоставить информации о подвижках, однако в восточной части картина более гладкая: общий светлый тон и черное пятно в области треугольного выступа контура оползня. Резкая граница между черным и белым в этом месте указывает на заворот фазы

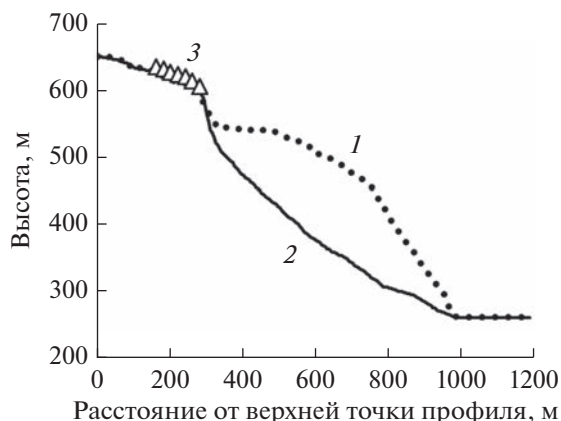


Рис. 3. Профили высот: 1 — до схода оползня, 2 — после схода оползня; 3 — положение нового подвижного участка на склоне.

при переходе через значение 2π , так что в целом значения фазы повышены относительно значений на соседних склонах, что в выбранной схеме обработки свидетельствует о смещении вниз по склону, причем значения смещения максимальны именно в черной области и составляют в среднем около 1 см в месяц на годичном интервале между съемками, проведенными 15 мая 2019 г. и 13 мая 2020 г.

На рис. 3 представлены профили высот вдоль оползневого склона до и после схода оползня, а также отмечено положение нового подвижного участка. Профили построены по цифровым моделям рельефа, полученным с помощью интерферометрической съемки группировкой TanDEM-X в 2012 г. (за шесть лет до схода оползня) и в 2020 г. (через полтора года после его схода). Расположение профилей на карте высот показано на рис. 1в: он начинается выше по склону, чем существующая стенка отрыва оползня, проходит вдоль всей оползневой чаши примерно по центру и заканчивается на уровне воды в р. Бурей (около 260 м над уровнем моря).

Новый подвижный участок, отмеченный треугольниками на рис. 3, находится на склоне на высоте ~400 м выше береговой линии. Среднемесячная величина смещений в верхней части сегмента в 2019 г. составляет около 1 см (в пересчете с измеренных 12 см/год; при этом следует отметить, что со сменой времен года скорости смещений могут меняться, поэтому указанный 1 см/мес — только усредненная оценка). Наибольшая скорость смещений зафиксирована в наиболее высотной области участка, в месте формирования новой стенки отрыва (см. рис. 2б, светлый тон в непосредственной близости от указателя белой стрелки). Весь ряд имеющихся интерферометрических данных до декабря 2018 г. свидетельствует о том, что этот участок был стабилен до схода оползня. Таким

образом, причиной его активизации представляется исчезновение опоры в виде сошедших оползневых масс ниже по склону. Можно предположить, что активизировавшийся оползневый процесс продолжит развиваться далее и закончится новым крупным сходом оползневого грунта. Учитывая, что ширина прорана в реке у подошвы оползня составляет около 150 м, существует опасность его перекрытия и возникновения новой чрезвычайной ситуации в виде подтопления населенных пунктов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря использованию данных радиолокатора L-диапазона PALSAR-2 удалось выявить новую область подвижек на береговом склоне р. Бурей, которая расположена в непосредственной близости от сошедшего в 2018 г. масштабного оползня, выше сформировавшейся ранее оползневой чаши. Размеры области составляют 150×300 м, величина смещения за период с мая 2019 по май 2020 г. составила по данным интерферометрической обработки 12 см. В связи с дестабилизацией склона возможно новое обрушение скального грунта и перекрытие русла реки. Факт выявления активизации оползневой чаши крайне важен для прогноза чрезвычайных событий в регионе, для обеспечения безопасного проживания населения региона, а также защиты промышленной и жилой инфраструктуры. Эта опасная оползневая зона требует организации безотлагательного регулярного мониторинга, в первую очередь радиолокационными средствами наблюдения, в том числе с помощью перспективного радиолокатора Кондор-ФКА, запуск которого намечен в ближайшее время.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность Японскому аэрокосмическому агентству JAXA за предоставленные архивные данные съемок радиолокатором PALSAR-2, а также Немецкому аэрокосмическому агентству DLR за предоставленные данные TerraSAR-X.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (№ 075-01133-22-00).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R. et al. // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333.
<https://doi.org/10.1109/5.838084>

2. *Chang W., Wang C., Chu C., Kao J.* // Proc. IEEE. 2012. V. 100. P. 2835.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2194629>
3. *Goldstein R.M., Engelhardt H., Frolich M.* // Science. 1993. V. 262. № 5139. P. 1525.
<https://doi.org/10.1126/science.262.5139.1525>
4. *Wang C., Zhang H., Zhang B. et al.* // Proc. IEEE IGARSS, Milan, 26–31 July 2015. N.Y.: IEEE, 2015. P. 1634.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2015.7326098>
5. *Massonnet D., Rossi M., Carmona C. et al.* // Nature. 1993. V. 364. P. 138.
<https://doi.org/10.1038/364138a0>
6. *Kursah M.B., Wang Y.* // Proc. IEEE IGARSS, Yokohama, 28 July–2 August 2019. N.Y.: IEEE, 2019. P. 939.
<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8898702>
7. *Wang Z., Liu G., Chen T. et al.* // Proc. 2nd Int. Conf. Comp. Eng. Tech., Chengdu, 16–18 April 2010. N.Y.: IEEE, 2010. V. 3. P. 222.
<https://doi.org/10.1109/ICCET.2010.5485843>
8. *Perissin D., Wang Z., Lin H.* // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens. 2012. V. 73. P. 58.
<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2012.07.002>
9. *Остроухов А.В., Ким В.И., Махинов А.Н.* // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 254.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-1-254-258>
10. *Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В. и др.* // ГеоРиск. 2019. Т. 13. № 4. С. 18.
<https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-30>
11. *Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М.* // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74>
12. *Захарова Л.Н., Захаров А.И.* // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277>
13. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И. и др.* // Совр. пробл. дистанц. зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 113.
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119>
14. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И. и др.* // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3.
<https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14>
15. *Zakharov A., Zakharova L.* // Remote Sens. 2022. V. 14. № 20. Article No. 5218.
<https://doi.org/10.3390/rs14205218>
16. *Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И.* // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 6. С. 26.
<https://doi.org/10.31857/S0205-96142019626-35>
17. *Bondur V., Chimitdorzhiev T., Dmitriev A., Dagurov P.* // Remote Sens. 2021. V. 13. Article No. 5136.
<https://doi.org/10.3390/rs13245136>