

История развития динамики Бурейского оползневого процесса по данным радиолокационной космической съемки

А.И. Захаров, Л.Н. Захарова

*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*

В докладе представлены результаты анализа данных интерферометрической обработки РСА ALOS-1/2 и Sentinel-1, полученных по оползневой территории на берегу реки Бурей в 2006–2018 гг., совместно с метеорологической информацией и временными рядами цифровых моделей рельефа SRTM-X, World3 DEM и TanDEM-X. Полученные результаты позволили сделать вывод, что Бурейский оползень развивался в рамках впадины, образованной, вероятно, древним стабильным в начале XXI века оползнем. Наполнение Бурейского водохранилища в 2003–2009 гг. с подъемом воды на 60 м и последующими сезонными колебаниями уровня предположительно спровоцировало оползневую деятельность. Оползневое движение в первую декаду может характеризоваться стабильной скоростью движения в течение всего года. Неуклонное увеличение количества осадков во второй декаде с обильными осадками в 2013, 2016 и 2018 гг. привело к заметному ускорению скорости движения оползня, особенно в теплое время года, с окончательным сходом в декабре 2018 г.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА), дифференциальная интерферометрия, цифровая модель рельефа (ЦМР), оползень, TanDEM-X, Бурей

History of the Bureya landslide dynamics according to satellite radar imagery

A.I. Zakharov, L.N. Zakharova

Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics, Fryazino branch.

The paper presents the results of analysis of the interferometric processing the ALOS-1/2 and Sentinel-1 SAR data acquired over the landslide territory of the Bureya river bank in 2006–2018 that were supplemented with meteorological information and time series of SRTM-X, ALOS-1, and TanDEM-X digital elevation models. The results allowed us to make a conclusion that the Bureya landslide was evolving within the frame of the depression formed by a relict landslide which was stable at least at the beginning of the 21st century. The Bureya reservoir filling in 2003–2009 with a 60 m rise of the water and subsequent seasonal water level oscillations supposedly triggered the landslide activity. The landslide movement in the first decade may be characterized by a stable rate of movement all year around. A steady increase in precipitation level in the second decade, with heavy rainfalls in 2013, 2016, and 2018 led to a prominent acceleration of the landslide rate of movement, especially in warm seasons, with a final landfall in December 2018.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), differential SAR interferometry, digital elevation model (DEM), landslide, TanDEM-X, the Bureya river

Введение

Бурейский оползень 2018 года является крайне необычным событием с точки зрения объема сошедшего грунта и потенциальных последствий для хозяйственной деятельности региона. Около 20 млн кубометров сошедшего 11 декабря 2018 года грунта перекрыли русло реки Бурей в 90 км от плотины Бурейской ГЭС выше по течению, став причиной быстрого подъема уровня воды в реке и угрозой затопления вышерасположенных селений. Длина поверхности скольжения оползня составила

около 800 м, ширина около 400 м, объём вынесенного грунта оценен величиной 18,5-18,9 млн м³ [1]. Для восстановления в реке водотока в слое оползневых скальных пород в период с 22 января по 1 февраля силами МЧС была проведена серия взрывов, после чего удалось сформировать протоку, обеспечившую снижение уровня воды в реке выше запруды. Весной паводковые воды существенно размыли и расширили перемычку, сняв опасность затопления в будущем. Одними из главных нерешённых вопросов до недавнего времени оставалось выяснение времени начала подвижек грунта и причины схода оползня.

Область исследования

Буряя — один из самых многоводных притоков Амура в Амурской области на Дальнем Востоке России. В среднем течении эта горная река течет по узкой каньонообразной долине, ширина которой в районе оползня около 1–1.5 км. Долина врезана на глубину 80-100 м в древнюю поверхность выравнивания [2] и имеет асимметричный профиль с крутым левым берегом и заметно более пологим правым. Высоты горных вершин на левом берегу достигают 400 м относительно водной поверхности, крутизна берегового склона в районе оползня около 35°. Питание реки смешанное, паводки носят муссонный характер. На теплое время года приходится 75-95% осадков. Самый дождливый месяц года — июль с 10 дождливыми днями и месячным количеством осадков до 140 мм. До возведения плотины Бурейской ГЭС и создания Бурейского водохранилища наводнения наблюдались почти ежегодно, катастрофические паводки случались раз в 10 лет.

Заполнение чаши водохранилища происходило в период 2003-2009 гг. В результате уровень воды в реке в районе оползня поднялся за три года на 60-70 м [3], ширина реки увеличилась с 200 до 400 метров. Узкое каньонное русло реки здесь – это средняя часть 230-километрового водохранилища, протянувшегося от плотины в Талакане до Чекунды. Вследствие работы ГЭС сезонные колебания уровня воды вблизи плотины порядка 16-20 метров наблюдаются и здесь, они являются причиной обезлесения в узкой прибрежной полосе на береговых склонах и, вероятно, причиной развития оползневых процессов.

Данные для исследования

Медленные, порядка первых сантиметров в год, смещения поверхности оползневых склонов являются надежным индикатором развития оползневого процесса. Поскольку оползневый склон на Бурее находится труднодоступной местности вдали от поселений, никакими визуальными, а тем более инструментальными наземными наблюдениями его движение до момента обрушения склона выявить было невозможно. Спутниковая радарная интерферометрия – это современный эффективный метод выявления наблюдения мелкомасштабной динамики подстилающей поверхности, с помощью которого все основные сведения о подвижках оползня в период с 2006 по 2017 гг. В качестве материала для измерений подвижек нами были использованы данные радаров Sentinel-1 (Европейское Космическое Агентство, ESA) и ALOS-1/2 (Японское Аэрокосмическое Агентство, JAXA).

В работе [4] показано, что данные радара Sentinel-1 С-диапазона (длина волны 5,6 см, минимальный интервал между съемками интерферометрической пары снимков 12 дней) оказались ограниченно полезны, хотя и обеспечили весьма точные измерения подвижек оползневого склона. Временная декорреляция отраженных сигналов в этом диапазоне особенно сильно проявляется при съемке поверхности, покрытой растительностью. Вследствие низкой когерентности отражаемых залесенным оползневым склоном сигналов интерферометрические измерения оказались

невозможны в теплое время года. В то же время, весьма высокая, более 0,5, когерентность в период установившейся морозной погоды в зимнее время (при условии интервала между съемками интерферометрической пары не более 12 дней) позволила провести оценки смещений по величине разности фаз на интерферограммах в две предшествующие зимы (2016-2017 и 2017-2018 гг.). Сигналы радаров L-диапазона ALOS-1/2 (длина волны 23 см) демонстрируют гораздо более высокую стабильность отражения – достаточно высокая когерентность наблюдалась на интервалах порядка 2 лет между зимними съемками снимков, из которых составлялись интерферометрические пары [5]. Сигналы на летних снимках демонстрируют меньшую когерентность, которая пропадает полностью в случае дождевых осадков во время или незадолго до сеанса съемки. Подчеркнем, что минимальный интервал между снимками интерферометрических пар радара Sentinel-1 равен 12 дням. Минимальный временной интервал между съемками пары радаром ALOS-1 равен 46 дней, у спутника ALOS-2 – 14 дней.

Результаты

Основные результаты измерений подвижек по данным радара Sentinel-1 и оценки точности измерений приведены в [4], а по данным ALOS-1/2 [5]. На рисунке 1 ниже эти измерения сведены на одном графике. Левый фрагмент — это данные о подвижках поверхности оползневого склона по данным PALSAR-1/2, средний фрагмент — это Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг., правый фрагмент — Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. Все измерения пересчитаны на направление вдоль по склону и нормированы к месячному интервалу между съемками сеансов интерферометрических пар.

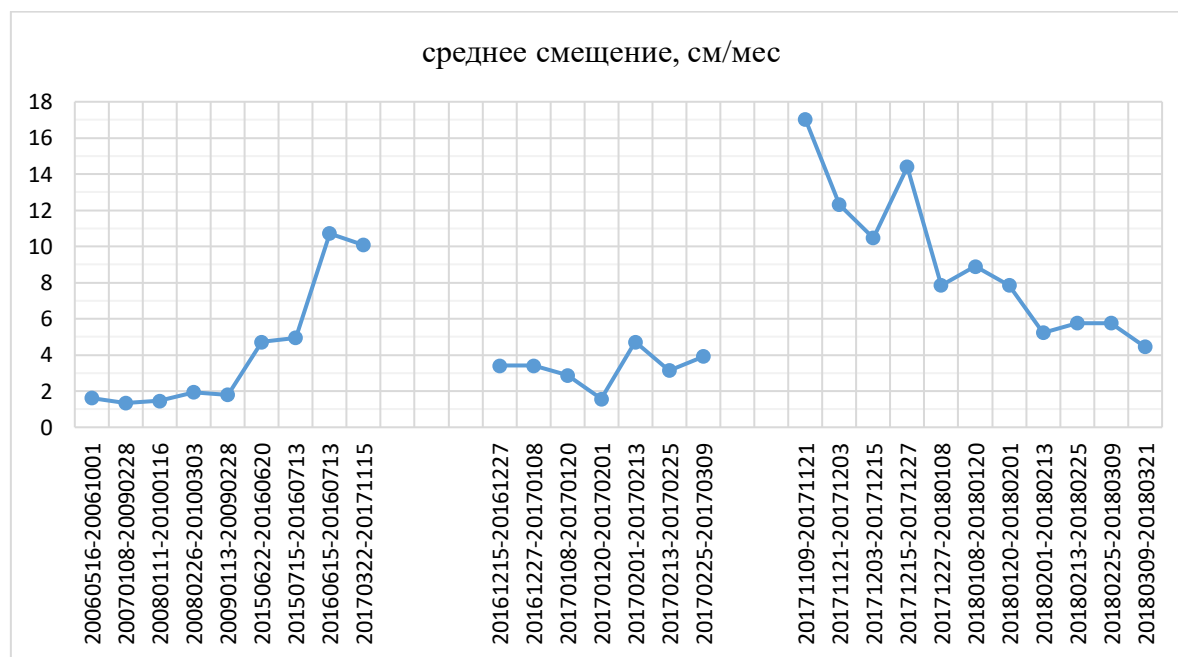


Рис. 1. Измерения подвижек поверхности оползневого склона по данным PALSAR-1/2 (левый фрагмент), Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (средний фрагмент) и Sentinel-1 зимой 2016-2017 гг. (правый фрагмент).

Анализ смещений по данным спутника ALOS-1 от 2006-2010 гг. (первые 5 точек графика) показывает, величина подвижек примерно одинакова и невелика на зимних, летних, и на двухгодичных интервалах измерений, что может быть объяснено ранней и медленной стадией развития оползневого процесса. По данным PALSAR-2 скорость смещений поверхности оползня возрастает в 2.5 раза в наблюдениях на годичном

интервале в 2015-2016 годах (точки 6 и 7) Данные об уровне дождевых осадков в теплое время года на графике рис. 2 позволяют предположить влияние возросшего объема влаги в почве на рост оползневой динамики. А на коротком летнем интервале 2016 года среднемесячная скорость оказалась больше в 5 раз (точки 8 и 9). Очевидная причина видимой возросшей скорости в том, что интегральные измерения подвижек во время интенсивных летних осадков нормировались здесь только на летний интервал времени. Суммарные годовые подвижки, очевидно, нормировались на годичный интервал времени, включающий зимнее время, когда в отсутствие дождевых осадков скорость подвижек оползневого склона должна снижаться.



Рис. 2. Годичное количество осадков в период 2006-2019 гг.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, в первой декаде 21 века скорость смещений была примерно одинакова в течение года, а во второй декаде она заметно выше, как правило, летом. Наименьшая измеренная средняя скорость движения отмечена для начала периода наблюдения в 2006 году. Вероятной причиной запуска оползневого процесса является заполнение водохранилища в 2003-2009 годах, и последующие сезонные колебания уровня воды вследствие работы ГЭС. Рост ежегодного количества дождевых осадков во второй декаде, а также аномально сильные осадки 2013, 2016 и 2018 годов сильно ускорили движение оползня по склону в теплое время года, что привело в итоге к катастрофическому сходу оползневых масс в реку.

Расширить представление об истории и причинах оползневого процесса в данном месте могут современные высокодетальные данные о рельефе из миссий SRTM, ALOS-1, TanDEM-X [6]. На рис. 3а) приведено изображение искусственно освещенного рельефа, построенного по данным TanDEM-X, которые были получены до схода оползневых масс. Точка освещения находится на 245° по азимуту и 50° по углу места. Благодаря таким условиям освещения вдоль склона, спадающего вниз к реке под углом 35° , неровности поверхности склона оказываются хорошо подчеркнутыми. На рис. 3б) — оптическое изображение, сделанное со спутника Sentinel-2 после схода оползня, через 7 лет после съемки ЦМР TanDEM-X.

Стрелками на рис. 3 отмечено положение стенки отрыва оползня, плохо различимой на изображении Sentinel-2 из-за скользящего направления освещения обрывистого уступа оползневого цирка. Видимые на искусственно освещенном рельефе темные линии подчеркивают положение границ депрессии в рельефе глубиной 10-30 м в районе стенки отрыва. Именно в пределах границ этой депрессии впоследствии произошел сход оползня.

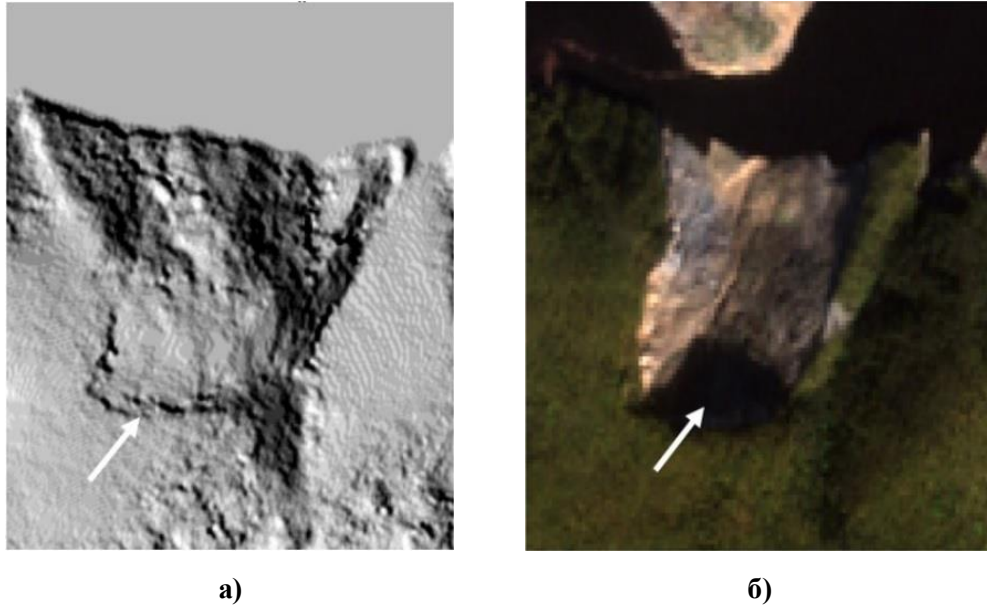


Рис. 3. Фрагменты изображений, содержащие область оползня: а) – искусственно подсвеченный рельеф на основе данных группировки TanDEM-X, б) – изображение, полученное оптическим сенсором Sentinel-2

Анализируя временную последовательность данных о рельефе SRTM-X, АЛОС-1 и TanDEM-X (рис. 4), можно несколько уточнить временные рамки образования этой депрессии. Данные о рельефе из радарной интерферометрической миссии SRTM-X (рис. 4а) были получены в 2000 г., они доступны с разрешением 30 м по поверхности. Данные о рельефе World3 DEM из миссии ALOS-1 (рис. 4б) были получены с помощью стереоскопической съемки прибором PRISM в 2006-2009 гг., они также доступны с разрешением 30 м. Представленные на рис. 4в) данные о рельефе TanDEM-X немецкого аэрокосмического центра DLR — это фрагмент глобальной DEM с разрешением 12 м по поверхности. Для большей наглядности все карты высот даны по модулю 256 м (т.е. высоты с разницей, кратной 256 м, отображаются одним тоном), яркость на них возрастает с ростом высоты в пределах каждого отрезка по 256 м от чёрного к белому. Стрелкой на всех картах указано положение надоползневого уступа. Следует отметить существование депрессии на карте высот SRTM-X, полученной в 2000 году, задолго до начала заполнения водохранилища.

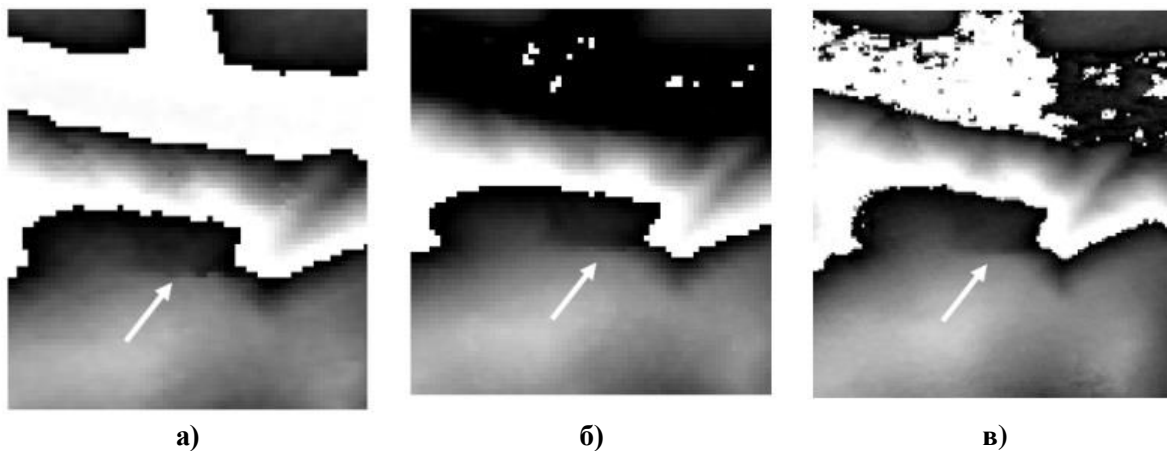


Рис. 4. Фрагменты цифровых моделей рельефа, построенных по данным миссий: а) – SRTM-X (2000 г.), б) – ALOS-1 PRISM (2009 г.), в) – TanDEM-X (2012 г.)

Заключение

Таким образом, можно заключить, что Бурейский оползень развивался в пределах депрессии, находящейся, вероятно, на месте древнего оползня, находившегося долгое время в стабильном состоянии. Заполнение чаши водохранилища в 2003-2009 годах с подъемом воды на 60 м и дальнейшие ежегодные колебания уровня на 15-20 м привели к запуску оползневой процессу, который закончился сходом громадного объема грунта в реку 11 декабря 2018 года.

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

Литература

1. Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Бурей по данным Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74.
2. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В. Крупный оползень в долине реки Бурей и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС // Вестник ДВО РАН. 2019. № 2. С. 35-44.
3. 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 радаром L-диапазона на примере реки Бурей // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3-14. DOI: 10.31857/S0205-9614201953-14.
4. Захарова Л.Н., Захаров А.И. Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурей по данным интерферометрической съемки 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.
5. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Долговременный мониторинг оползневой процессу на берегу реки Бурей по данным интерферометрической съемки радаром 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.
6. Zakharov, A.; Zakharova, L. The Bureya Landslide Recent Evolution According to Spaceborne SAR Interferometry Data. Remote Sensing. 2022. 14(20). 5218. <https://doi.org/10.3390/rs14205218>.