

Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Буряя по данным Sentinel-1

Л. Н. Захарова¹, А. И. Захаров¹, Л. М. Митник²

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

² *Тихоокеанский океанологический институт им. В. И. Ильичева ДВО РАН
Владивосток, 690041, Россия
E-mail: mitnik@poi.dvo.ru*

В работе приведены первые результаты оценки последствий оползня на р. Буряя в декабре 2018 г. методом радиолокационной интерферометрии по данным космического радара с синтезированной апертурой Sentinel-1. По результатам обработки 18 пар снимков с различными интервалами между съёмками, полученными в период с 5 декабря 2018 г. по 4 марта 2019 г., оценены масштабы оползневого явления. Оказалось, что в результате оползня 12 декабря 2018 г. объём сошедшего со склона сопки грунта составил не менее 18,5 млн м³, максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно цифровой модели рельефа SRTM после схода оползня достигло 140–150 м, площадь оползня в вертикальной проекции равна 22,8 га. Методами дифференциальной радарной интерферометрии показана стабильность поверхности оползневого склона в течение трёх месяцев после катастрофического события. Не выявлено также каких-либо заметных (более нескольких миллиметров) смещений почв берегового склона вследствие взрывных работ в перемычке русла реки в конце января 2019 г.

Ключевые слова: радар с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, оценка смещений поверхности, дифференциальная интерферометрия, оползень, цифровая модель рельефа

Одобрена к печати: 25.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74

Катастрофический оползень на р. Буряя, случившийся в декабре 2018 г. в 80 км ниже по течению от пос. Чекунда, перекрыл её русло, создав угрозу затопления близлежащих населённых пунктов, а также разрушения объектов жилой и промышленной инфраструктуры, расположенных у реки ниже по течению, из-за прогнозируемого на весну прорыва естественной плотины. Оползень сошёл, судя по данным оптического (Sentinel-2) и многоспектрального (Himawari-8) инструментов, 12 декабря 2018 г. (Крамарева и др., 2018). По произведённым в январе 2019 г. наземным измерениям, в длину оползень насчитывает около 800 м, объём сошедшего грунта составляет около 19 млн м³ (Остроухов и др., 2019). Для восстановления в реке водотока в слое оползневых скальных пород в период с 22 января по 1 февраля была проведена серия взрывов, после чего удалось сформировать протоку, обеспечившую снижение уровня воды в реке выше запруды (Крамарева и др., 2019). Но поскольку объём движения воды по ней не соответствует естественному, работы по обустройству второй протоки были продолжены.

Первые представления о масштабах катастрофического природного явления были получены с помощью оптического снимка со спутника Sentinel-2 от 12 декабря (Крамарева и др., 2018), на котором отчётливо видны изменения ландшафта: расположение и геометрические размеры оползня. Более поздние снимки района оползня в первые дни после него оказались не столь информативны из-за плотного облачного покрова. Всепогодные методы радиолокационного наблюдения поверхности, включая методы радиолокационной интерферометрии, позволяют существенно расширить представления о масштабах и динамике развития

подобных природных явлений. С целью более детального анализа этого оползневого явления нами были использованы данные европейского спутника наблюдения Земли Sentinel-1 с радаром с синтезированной апертурой (РСА) на борту, получаемые с повторяющихся орбит носителя с периодом повторения 12 дней. В результате обработки изображений, снятых в период с 5 декабря 2018 г. по 27 февраля 2019 г., было построено и проанализировано 17 интерферограмм для пар снимков, полученных с условных трасс 134 и 61 спутника Sentinel-1 с различными интервалами между повторяющимися съёмками.

Разность фаз $\Delta\varphi$ на интерферограмме, сформированной в результате совместной обработки пары радиолокационных снимков, содержит в первом приближении информацию о рельефе (топографическая фаза $\Delta\varphi_t$), мелкомасштабной динамике (смещениям) отражающей поверхности $\Delta\varphi_d$, флуктуациях фазы на трассе распространения сигнала $\Delta\varphi_a$, тепловых шумах аппаратуры и шумах обработки $\Delta\varphi_N$ и др. Ограничившись первыми двумя составляющими, запишем, следуя (Захаров и др., 2015):

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d = -4\pi(\lambda r \cdot \sin \alpha)^{-1} l_p \Delta h - 4\pi\lambda^{-1} \Delta r_d. \quad (1)$$

Отметим, что чувствительность интерферометрической разности фаз к вариациям высот рельефа Δh растёт с увеличением перпендикулярной компоненты интерферометрической базы l_p , с уменьшением длины волны λ , угла обзора α и наклонной дальности r до поверхности. Для радара Sentinel-1 длина волны равна 5,6 см, наклонная дальность от радара до поверхности оползня — 820 км. Важным числовым показателем чувствительности $\Delta\varphi_t$ к рельефу является высота неоднозначности h_a , обозначающая такой перепад высоты рельефа между двумя точками на местности, при котором значения разности фаз на интерферограмме в соответствующих элементах изображения отличаются на 2π :

$$h_a = \lambda r (2l_p)^{-1} \sin \alpha. \quad (2)$$

Характеризующая динамику отражающей поверхности разность фаз $\Delta\varphi_d$ связана с изменением разности наклонных дальностей от радара до элемента поверхности из-за его смещения на величину Δr_d за время между съёмками. Отметим характерную для радиолокационной интерферометрии неопределённость, заключающуюся в том, что формально невозможно разделить влияние на разность фаз интерферограммы вариаций высот рельефа и подвижек отражающей поверхности, участвующих в формуле (1). Так, сдвиг фазы на 2π рад может быть порождён как вариациями высот рельефа на величину h_a (обычно это десятки или сотни метров), так и перемещением Δr_d отражающей поверхности в радиальном направлении на половину длины волны сигнала (для наблюдений с помощью РСА Sentinel-1 это перемещение составляет 2,8 см).

Оценить расположение оползня и размеры образовавшейся плотины на реке позволяет пара снимков, полученная 10 и 22 декабря 2018 г. (рис. 1).

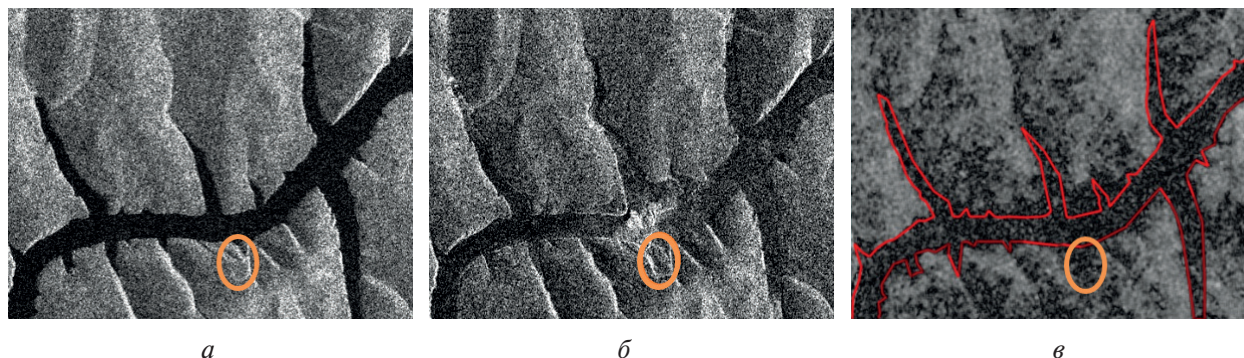


Рис. 1. Амплитудные изображения: *a* — 10 декабря 2018 г. до схода оползня; *б* — 22 декабря 2018 г. после схода оползня; *в* — интерферометрическая когерентность этой пары

Амплитудные изображения (см. *рис. 1а, б*) показывают изменившиеся контуры оползневого склона (отмечен оранжевым эллипсом) и возникшую каменную перемычку посреди русла реки — она ярко отражает сигнал по сравнению с тёмным фоном льда непосредственно над оранжевым контуром на *рис. 1б*, — а также изменения на противоположном берегу, возникшие в результате поднятой оползнем водно-ледяной волны (смытый лес). Карта интерферометрической когерентности (см. *рис. 1в*) для этой пары показывает полную декорреляцию сигналов на месте оползня и высоко по противоположному берегу реки, отмечая границу разрушительного воздействия волны. Красным контуром на карте когерентности показана береговая линия.

Области декорреляции (показаны тёмным цветом на *рис. 1в*) не ограничиваются льдом реки и местоположением оползня: многочисленные тёмные пятна имеются в большом количестве на обоих берегах, поросших лесом. Причина этого заключается во временной декорреляции: за 12 сут между съёмками на поверхности, покрытой растительностью (лесом), успевают произойти изменения отражательных свойств (например, хаотичное смещение эффективных фазовых центров элементов изображения в результате смещения ветвей деревьев от ветра часто является причиной декорреляции при съёмке в С-диапазоне). Таким образом, в этой паре область схода оползня, а также области поваленного волной леса на противоположном берегу не могут дать достоверной фазовой информации. На всех последующих 12-дневных интервалах эти территории обладают, наоборот, повышенной когерентностью за счёт отсутствия на них живой растительности и, как следствие, большей стабильности поверхности. Соответственно, возможно не только отметить границы сошедшего грунта, но и отследить масштаб и динамику смещений поверхности после события. Во всех следующих по времени парах оба изображения сняты спутником Sentinel-1A после схода оползня и сигналы коррелированы в достаточной степени, чтобы разность фаз была информативной. На месте оползня на всех интерферограммах располагаются концентрические кольцевые структуры. Поскольку в результате схода грунта изменился рельеф поверхности, следует учитывать, что на интерферограмме отразится это новое состояние рельефа, поэтому для оценки смещений первостепенную важность имеет вопрос, какую составляющую в разность фаз $\Delta\phi$ привносит изменившаяся высота местности, отличающаяся от имеющейся цифровой модели рельефа ($\Delta\phi_r$).

РСА Sentinel-1 проводил съёмку исследуемой территории на нисходящем отрезке орбиты справа по ходу движения в широкозахватном режиме IW с шириной полосы захвата 240 км. Угол падения волн в пределах кадра менялся от 33° на ближнем краю до 43° на дальнем краю. Расстояние между пикселями изображения по наклонной дальности в формате SLC — 2,3 м, между строками — 14,1 м. В ходе интерферометрической обработки для снижения уровня шумов применено усреднение данных (4 пикселя) по дальности. При этом размеры пикселей изображения по азимуту и наземной дальности оказываются примерно одинаковыми. Для оценки объёма массы оползня была выбрана интерферограмма, полученная в период времени без активных взрывных работ. Поскольку при построении интерферограммы для коррекции топографической фазы использована цифровая модель рельефа SRTM, построенная задолго до оползня, рельеф, модифицированный в этом месте в результате схода оползня, чётко проявляется на интерферограмме (*рис. 2б*).

Место оползня на интерферограмме видно по светлому оваловому пятну в нижней части *рис. 2б*. В русле реки под оползневом склоном также видны перепады фазы, вызванные появлением насыпи. Красной линией отмечена типичная для радарного изображения область сжатия — наложения из-за высокой крутизны этой дальней от радара стенки оползня.

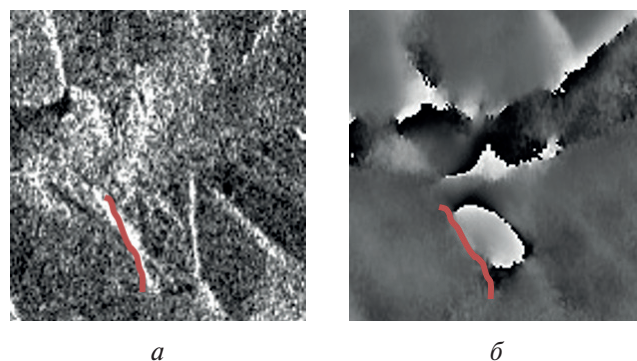


Рис. 2. Пара 3–15 января 2019 г., район оползня: *а* — амплитудное изображение; *б* — интерферограмма

Эта же линия использована для разрешения 2 π -неоднозначности при развёртке разности фаз на интерферограмме. Интегрирование разности фаз в пределах оползня позволило оценить объём вынесенной массы скального грунта. По нашим оценкам, с учётом высоты неоднозначности 119 м для использованной интерферометрической пары и площади пикселя на интерферограмме 187 м², объём вынесенного оползнем грунта составил 18,5 млн м³, что согласуется с величиной 18,9 млн м³, полученной в работе (Остроухов и др., 2019). Максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно модели рельефа SRTM после схода оползня достигает 140–150 м (что также соответствует морфометрической модели поверхности скольжения и оползневого тела (Остроухов и др., 2019)), площадь оползня в вертикальной проекции равна 22,8 га.

Значительно снизить влияние рельефа на разность фаз позволяет использование пар с короткими базами интерферометра. В этом случае изменение фазы на период 2 π соответствует изменению высоты рельефа в несколько километров. Таким образом, несколько десятков метров (оцениваемая толщина съехавшего на реку пласта грунта) будут соответствовать

очень небольшому отклонению разности фаз. Так, в паре 15–27 февраля 2019 г. база интерферометра l_p равна 9 м, высота неоднозначности h_a составляет 1957 м и на интерферограмме (рис. 3б) на месте оползня не заметны какие-либо отклонения фазы из-за рельефа за исключением небольших пятен в нижней части, обусловленных сниженной когерентностью и поэтому зашумлённых.

На интерферограмме (см. рис. 3б) поперёк оползня построен профиль (значения фазы вдоль красной линии см. на рис. 4). Никаких заметных изменений фазы, кроме незначительных колебаний в пределах 0,5 рад (этот фазовый сдвиг в соответствии с выражением (2) мог бы быть порождён перемещением поверхности на 2 мм), нет, что свидетельствует о неподвижности этого участка поверхности в период 15–27 февраля 2019 г. Зашумлённые края профиля (до 20-го пикселя и после 55-го) попадают на неповреждённую часть сопки, поросшую лесом, в результате чего имеет место искажение фазы за счёт временной декорреляции.

Аналогичные результаты получены при использовании пар снимков 17–29 декабря 2018 г. (база 8 м) и 10–22 января 2019 г. (база 16 м), что позволяет утверждать, что после схода оползня отсутствовала какая-либо мелкомасштабная динамика поверхности в конце декабря, середине января и конце февраля.

Окончательные точки над i в вопросе отслеживания смещений поверхности ставит вариант метода дифференциальной интерферометрии, заключающийся в вычитании двух интерферограмм с близкими значениями базы l_p . В этом случае нескомпенсированная топографическая фаза $\Delta\varphi_i$ оказывается одинаковой (или почти одинаковой) для обеих интерферограмм, и при их вычитании на дифференциальной интерферограмме остаётся разность фаз,

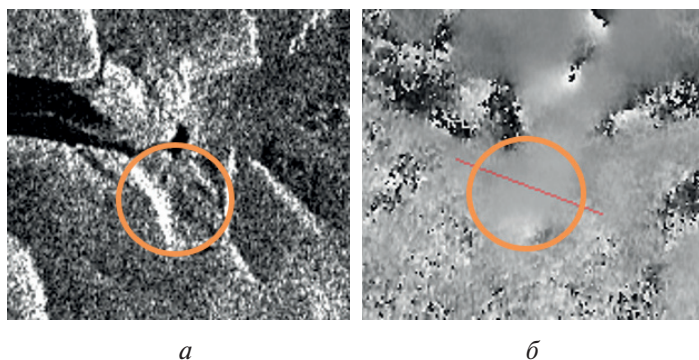


Рис. 3. Пара 15–27 февраля 2019 г., район оползня: а — амплитудное изображение; б — интерферограмма

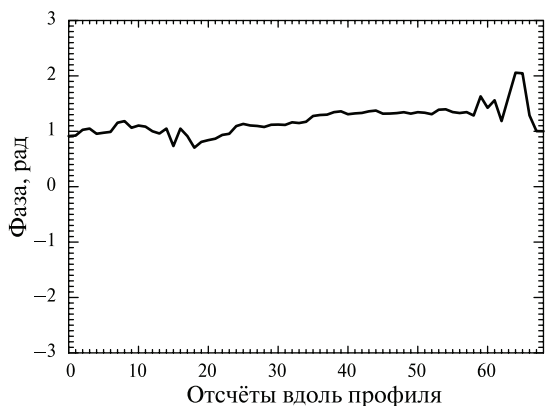


Рис. 4. Значения разности фаз вдоль профиля на рис. 3б

показывающая разницу в смещениях на первом и втором интервале между съёмками. На разности фаз интерферограмм 15–27 января 2019 г. (база 40 м) и 8–20 февраля 2019 г. (база 39 м) также не выявлено заметных (субсантиметровых) признаков смещения поверхности, что позволяет говорить об отсутствии каких-либо видимых последствий взрывных работ 22–27 января 2019 г. на состояние оползневого склона.

Подводя итог исследованиям динамики отражающей поверхности оползневого склона, можно говорить о его стабильности после схода тела оползня 12 декабря 2018 г. Взрывные работы в слое оползневых скальных пород в конце января не имели следствием какой-либо мелкомасштабной динамики поверхности оползневого склона. В результате собственно оползня 12 декабря 2018 г. объём сошедшего со склона сопки грунта составил 18,5 млн м³. Максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно модели рельефа SRTM после схода оползня достигло 140–150 м, площадь оползня в вертикальной проекции равна 22,8 га.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 18-07-00816).

Литература

1. Захаров А. И., Яковлев О. И., Смирнов В. М. Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности. 3-е изд. М.: URSS, 2015. 248 с.
2. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амелченко Ю. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шапилова Ю. А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурея 11 декабря 2018 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
3. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амелченко Ю. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шапилова Ю. А., Бородинская А. В. Наблюдение за ходом взрывных работ и устройством прорана в зоне схода скальных пород на реке Бурея // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 259–265.
4. Остроухов А. В., Ким В. И., Махинов А. Н. Оценка морфометрических параметров оползня на Бурейском водохранилище и его последствий на основе ДДЗЗ и данных полевых измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 254–258.

First results of radar monitoring of the landslide consequences on the Bureya riverbank using Sentinel-1 data

L. N. Zakharova¹, A. I. Zakharov¹, L. M. Mitnik²

¹ V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Russia

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

² V. I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS, Vladivostok 690041, Russia

This paper presents first SAR interferometric measurements results of the assessment of aftermath of the landslide on the Bureya riverbank occurred in December 2018. Interferometric processing chain was applied to 18 image pairs acquired by Sentinel-1 satellite from December 5, 2018 to March 4, 2019. Analysis of processing results allowed estimating the landslide extent. Volume of soil slid down from the riverbank slope into the riverbed on December 12, 2018 was proved to be more than 18.5 million m³. The maximal vertical displacement of the scattering surface after the landslide reached 140–150 m with respect to the SRTM digital elevation model, the landslide area in the vertical projection is estimated to be about 22.8 ha. Differential radar interferometry technique was applied to reveal and confirm

the stability of the landslide surface during three months after the catastrophic event. No noticeable displacement (above first millimeters) of the riverbank soils because of the blasting operations in the riverbed cofferdam in the end of January 2019 was detected.

Keywords: synthetic aperture radar (SAR), SAR interferometry, estimation of surface displacement, differential interferometry, landslide, digital elevation model

Accepted: 25.03.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-69-74

References

1. Zakharov A. I., Yakovlev O. I., Smirnov V. M., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Radiolokatsionnoe zondirovanie poverkhnosti* (Satellite Monitoring of the Earth: Radar Sounding of the Surface), Moscow: URSS, 2015, 248 p.
2. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krasheninnikova Yu. S., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Nablyudenie zony obrusheniya sopki v raione reki Bureya 11 dekabrya 2018 goda (Observation of the hill collapse zone near the Bureya River on December 11, 2018), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 266–271.
3. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krasheninnikova Yu. S., Sukhanova V. V., Shamilova Yu. A., Boroditskaya A. V., Nablyudenie za khodom vzryvnykh rabot i ustroystvom prorana v zone skhoda skal'nykh porod na reke Bureya (Observing the progress of blasting operations and channeling in the area of the rock slide on the Bureya River), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 259–265.
4. Ostroukhov A. V., Kim V. I., Makhinov A. N., Otsenka morfometricheskikh parametrov opolznaya na Bureiskom vodokhranilishche i ego posledstviy na osnove DDZZ i dannykh polevykh izmerenii (Estimation of the morphometric parameters of the landslide on the Bureyskoe Reservoir and its consequences on the basis of remote sensing data and field measurements), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 254–258.