

## Наблюдение динамики зоны оползня на реке Буряя по данным интерферометрической съёмки Sentinel-1 в 2017–2018 гг.

Л. Н. Захарова, А. И. Захаров

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

В статье описаны результаты обработки данных интерферометрической съёмки района склона с активными оползневыми процессами на берегу р. Буряя европейским космическим радаром Sentinel-1 в период с конца 2016 г. по декабрь 2018 г., определённый наличием радарных снимков этого участка в общедоступном архиве данных. Методами дифференциальной радарной интерферометрии были измерены смещения поверхности оползневого склона в холодное время года с низкими отрицательными температурами, когда интерферометрическая когерентность отражённых поверхностью сигналов достаточно высока. Мелкомасштабные радиальные смещения оползневого склона достигали величины 0,5–0,7 см за 12 дней и были постоянны в течение зимы 2016–2017 гг. Зимой 2017–2018 гг. радиальные скорости смещения поверхности оползня монотонно уменьшались от 3 см за 12 дней в начале сезона с низкими температурами воздуха до 0,7 см в конце. Из-за низких значений когерентности в тёплое время года измерения смещений поверхности методами классической интерферометрии оказались невозможны, однако по характеру изменения когерентности во времени сделано предположение о резкой активизации оползневых процессов в конце весны 2018 г. Сделано заключение, что предвестники опасного схода оползневой массы в реку 11 декабря 2018 г. могли наблюдаться двумя годами ранее.

**Ключевые слова:** радар с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, оценка смещений поверхности, дифференциальная интерферометрия, интерферометрическая когерентность, оползень

Одобрена к печати: 20.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277

Радиолокационная интерферометрия широко используется для картирования рельефа подстилающей поверхности и выявления/измерения смещений подстилающей поверхности за время между повторяющимися съёмками. Информативным признаком для этих измерений является разность фаз на интерферограмме. Качество фазовых измерений определяется степенью когерентности отражённых поверхностью сигналов. Одним из наиболее критичных факторов, снижающих когерентность, является временная декорреляция, порождаемая изменением микрорельефа поверхности и её диэлектрических свойств. Временная декорреляция растёт с увеличением времени между сеансами съёмки, составляющими интерферометрическую пару. При использовании измерений в коротковолновых диапазонах съёмки, таких как С- и X-диапазоны волн, временная декорреляция влияет сильнее, чем за тот же промежуток времени в L- и P-диапазонах с большей длиной волны.

Методы радарной интерферометрии широко применяются для мониторинга опасных оползневых процессов, позволяют выявлять многолетние мелкомасштабные смещения почв в зоне оползня, а также проводить оценку последствий резкого схода оползневых масс. В работе (Захарова и др., 2019) по данным космического радара Sentinel-1 нами были проведены исследования береговой зоны р. Буряя после схода оползня в декабре 2018 г., перекрывшего русло реки (Крамарева и др., 2018). Полученная оценка объёма оползневых масс 18,5 млн м<sup>3</sup> близка к оценке из работы (Остроухов и др., 2019), сделанной при помощи математического моделирования. Одним из наиболее существенных результатов является заключение о стабильности зоны оползня и близлежащих речных склонов зимой в период с конца декабря 2018 г. до конца марта 2019 г. Не было выявлено достоверных подвижек поверхности, которые

могли быть спровоцированы взрывными работами по пробивке канала в оползневой перемычке в последнюю декаду января 2019 г. (Крамарева и др., 2019).

Поиск предвестников оползня — мелкомасштабных медленных смещений отражающей поверхности — является интересной, важной, хотя и зачастую сложной задачей. К сожалению, все общедоступные данные радарной съёмки зоны оползня, которые можно было бы использовать для изучения долговременной истории развития оползневой поверхности на Бурее, проводились в коротковолновых диапазонах и, как правило, со слишком большими интервалами между повторяющимися съёмками, что имело следствием полную декорреляцию отражённых сигналов. Это относится к данным ERS-2 (съёмки 1995–2011 гг.), ENVISAT (2002–2012), TerraSAR-X (2007 – наст. вр.). Данные радара Sentinel-1 являются исключением в том плане, что архив доступных для анализа данных района оползня на Бурее покрывает промежуток времени с осени 2016 г. по настоящее время с относительно коротким интервалом между съёмками 12 дней.

Радар спутника Sentinel-1 проводит съёмку в С-диапазоне (длина волны 5,6 см). Временная декорреляция отражённых сигналов этого диапазона особенно сильно проявляется при съёмке поверхности, покрытой растительностью. Сильное ветровое волнение крон деревьев или изменение влажности отражающей поверхности вследствие, например, дождя приводят к снижению когерентности и потере информации о разности фаз. Сравнительно крупномасштабные, масштаба половины длины волны и более, хаотические смещения фрагментов поверхности также приводят к декорреляции. Напротив, замерзание влаги почвы и растительных покровов зимой повышает стабильность отражения и улучшает когерентность. Для сравнения значений когерентности в летнее и зимнее время года на *рис. 1* приведён график когерентности по трём тестовым участкам для 42 интерферометрических пар сеансов Sentinel-1, проведённых в период 09.11.2017–16.03.2019 (даты первой и второй съёмки пары приведены по горизонтальной оси через тире в формате гггг.мм.дд).

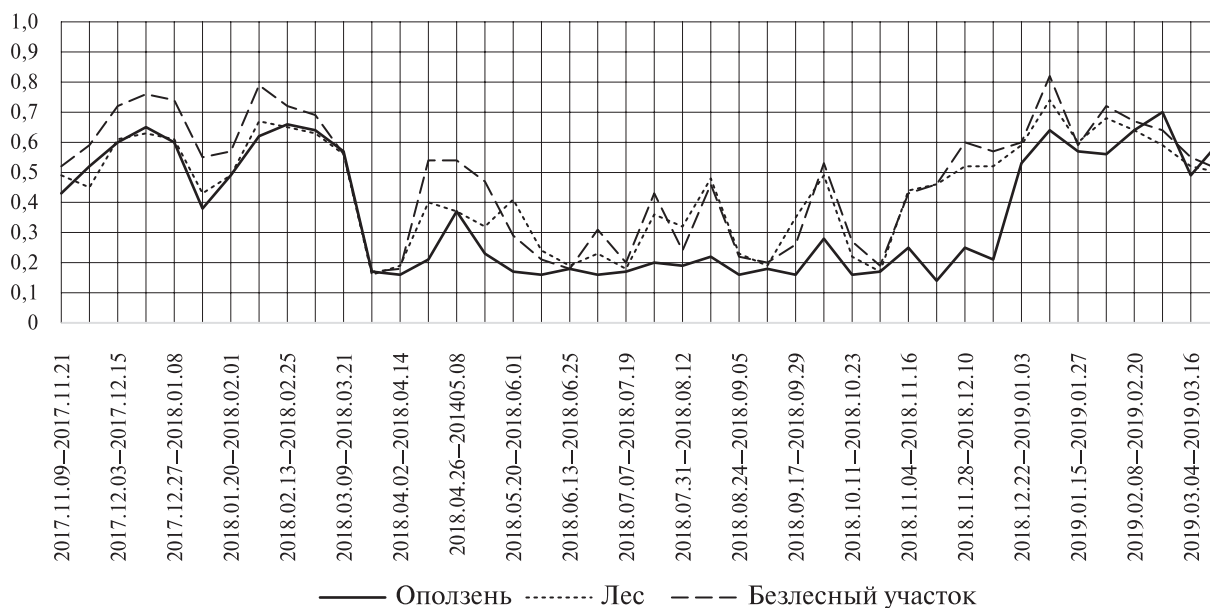
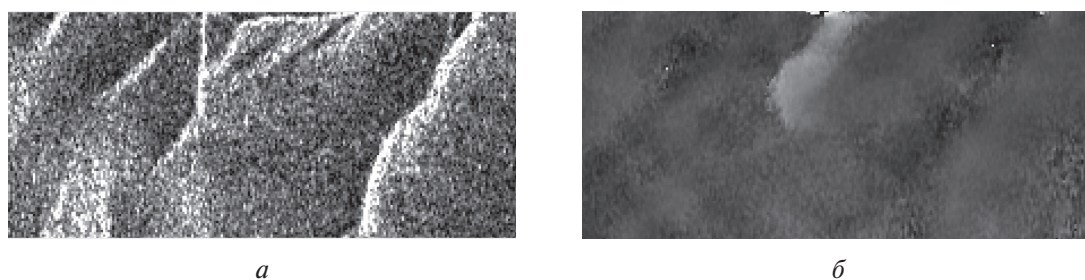


Рис. 1. График когерентности для безлесной поверхности, леса и оползневой поверхности

Когерентность на безлесной поверхности (штриховая линия), как правило, наиболее высокая. Лесные покровы (пунктир) демонстрируют в целом меньшую временную стабильность отражения, чем открытые почвы. Оползневой склон (сплошная линия) покрыт лесом, и, исходя из этого, отражённые данным участком сигналы должны иметь когерентность, близкую к когерентности лесного участка. Это справедливо для зимы 2017–2018 гг. (первая четверть графика на *рис. 1*). Однако весной 2018 г. графики когерентности леса и оползневой поверхности расходятся. Когерентность на оползневом склоне не возрастает в ноябре 2018 г. с наступлением

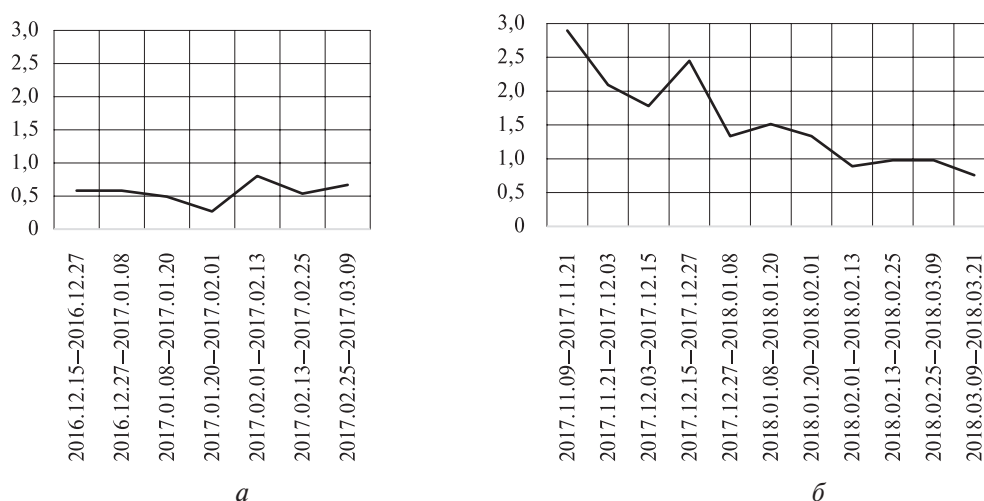
холодного времени года с низкими температурами, в отличие от леса и безлесной поверхности (правая часть графика на *рис. 1*). Она достигает значений для леса и безлесных участков лишь в конце декабря 2018 г. после схода оползня. Объяснением этому может быть активизация оползневого процесса в мае 2018 г., приведшая сначала к мелкомасштабным радиальным смещениям почвы на величину более половины длины волны за 12 дней съёмки и завершившаяся в декабре сходом оползня.

Низкая когерентность отражаемых оползневой поверхностью сигналов в тёплое время года (средняя часть графиков на *рис. 1*) не позволила провести измерения смещений методами классической дифференциальной интерферометрии. Однако весьма высокая, более 0,5, когерентность в период установившейся морозной погоды в зимнее время дала возможность провести оценки смещений по величине разности фаз на интерферограммах. Типичная интерферограмма из набора пригодных для анализа фазовой информации, с явными признаками подвижек оползневой склона (светлое пятно), приведена на *рис. 2*. Светлые (по сравнению с окружающим тёмным фоном) тона на *рис. 2б* обозначают смещение поверхности от радара за время между съёмками, что в нашем случае соответствует движению вниз по склону в сторону реки (она находится за верхним обрезом рисунка).



*Рис. 2.* Амплитудное изображение (*а*) и интерферограмма (*б*) окрестностей оползневой участка на р. Бурья, построенная по данным 25 февраля и 9 марта 2018 г.

После схода оползня нами не было замечено никаких смещений поверхности величиной более 2 мм и был сделан вывод о стабилизации оползневой участка (Захарова и др., 2019). Однако в две предшествующие зимы (2016–2017 и 2017–2018 гг.) на оползневом склоне имеются явные признаки смещения поверхности. Графики максимальных значений радиальных смещений по направлению от радара в пределах оползневой склона за 12-дневные промежутки приведены на *рис. 3*.



*Рис. 3.* Максимальные радиальные смещения поверхности оползня (в см): *а* — зимой 2016–2017 гг., *б* — зимой 2017–2018 гг.

Судя по графику на *рис. 3а*, зимой 2016–2017 гг. имела место умеренная и постоянная скорость подвижек почвы на уровне 0,7 см за 12 дней в среднем. Следующей зимой (см. *рис. 3б*) скорость смещения возросла до 3 см за 12 дней в начале, а затем постепенно уменьшалась до 0,7 см в конце холодного времени года. Чтобы найти реальное смещение по склону, необходимо ввести мультипликативный коэффициент, учитывающий величину угла обзора  $32^\circ$  и уклона местности. Считая в первом приближении склон плоскостью, наклонённой под  $30^\circ$  к горизонтали, можно подсчитать итоговый коэффициент (Захаров и др., 2018), составивший в данном случае 2,35. Следовательно, максимальное смещение почвы по склону в начале зимы 2017–2018 гг. достигало 7 см за 12 дней, а к концу этой зимы и в предыдущую зиму составляло около 1,6 см за 12 дней.

Таким образом, анализ данных Sentinel-1 показывает, что оползневый процесс шёл по меньшей мере с начала зимы 2016–2017 гг. Судя по уровню когерентности, резкая активизация оползневого процесса, предположительно, произошла весной 2018 г., завершившись масштабным сходом оползня в декабре 2018 г.

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

### Литература

1. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Красногорский М. Г. Мониторинг оползневой активности методами радарной интерферометрии с помощью трехгранных уголкового отражателя // Исследование Земли из космоса. 2018. № 3. С. 80–92.
2. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Митник Л. М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Бурея по данным Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74.
3. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амельченко Ю. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова 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.
4. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амельченко Ю. А., Бурцев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова 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.
5. 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.

### Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018

L. N. Zakharova, A. I. Zakharov

V.A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch  
Fryazino, Moscow Region 141190, Russia  
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

The paper describes the results of interferometric processing of Sentinel-1 radar data acquired since November 2016 till December 2018 over the area with active landslide activity on the Bureya riverbank. Radar differential interferometry technique was applied to measure landslide surface displacements in

cold seasons of the year with low air temperatures below zero, when interferometric coherence of scattered signals in repeated observations was sufficiently high. Small-scale radial displacements were about 0.5–0.7 cm per 12 days; the velocity of displacements was stable all the winter 2016–2017. In the beginning of winter 2017–2018 the radial velocity was as high as 3 cm per 12 days; it was decreasing gradually till the end of cold season to the value 0.7 cm/12 days. Conventional radar interferometry approach to measuring the displacements during warm period of the year was inapplicable because of low interferometric coherence, but analysis of the coherence temporal behavior allows making a conclusion about abrupt activation of soil sliding in the end of spring 2018. An overall conclusion is that the precursors of the December 2018 landslide could be observed on Sentinel-1 radar data two years earlier.

**Keywords:** synthetic aperture radar (SAR), SAR interferometry, estimation of surface displacement, differential interferometry, interferometric coherence, landslide

Accepted: 20.04.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-273-277

## References

1. Zakharov A. I., Zakharova L. N., Krasnogorsky M. G., Monitoring opolznevoi aktivnosti metodami radarnoi interferometrii s pomoshch'yu trekhgrannykh ugolkovykh otrazhatelei (Monitoring of the landslide activity using radar interferometric observations of trihedral corner reflectors), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 3, pp. 80–92.
2. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Mitnik L. M., Pervye rezul'taty radiolokatsionnogo monitoringa posledstviy opolznaya na reke Bureya po dannym Sentinel-1 (First Results of the Assessment of the Landslide Consequences on the Bureya Riverbank Using Sentinel-1 Radar Data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 69–74.
3. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krashennnikova 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.
4. Kramareva L. S., Loupian E. A., Amelchenko Yu. A., Burtsev M. A., Krashennnikova 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.
5. 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.