

Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Бурья по данным интерферометрической съёмки радаров L-диапазона

В. Г. Бондур¹, Л. Н. Захарова², А. И. Захаров², Т. Н. Чимитдоржиев³,
А. В. Дмитриев³, П. Н. Дагуров³

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга
«Аэрокосмос», Москва, 105064, Россия
E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

³ Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, 670047, Россия
E-mail: tchimit@gmail.com

Приведены результаты интерферометрической обработки и анализа снимков японских космических радаров L-диапазона PALSAR-1 и PALSAR-2, охватывающих участок р. Бурья с оползневой склоном, где в декабре 2018 г. произошёл сход грунта объёмом не менее 18,5 млн м³. Доступные для обработки архивные радарные данные охватывают периоды с 2006 по 2011 г. и с 2014 г. по настоящее время, что позволяет изучить долговременную динамику развития этого оползневого явления. Благодаря сравнительно высокой временной стабильности отражательных свойств подстилающей поверхности в L-диапазоне оказалось возможным выявлять подвижки поверхности оползня и оценивать их интегральную амплитуду на временных интервалах до двух лет. Согласно проведённым оценкам, скорость смещения грунта в пределах оползня летом, как правило, выше, чем зимой. Смещения невелики в 2006–2010 гг. (1,6–1,9 см/мес), затем в 2015–2016 гг. они значительно возрастают (4,7–4,9 см/мес), максимальная измеренная скорость достигнута летом 2016 г. и составляет 10,7 см/мес. Вероятно, активизация оползневого процесса приходится на время завершения наполнения чаши водохранилища в 2006–2009 гг. и спровоцирована как первоначальным подъёмом, так и сезонными колебаниями уровня воды.

Ключевые слова: Бурья, радар, PALSAR, радиолокационная интерферометрия, оценка смещений поверхности, оползень, водохранилище

Одобрена к печати: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119

Катастрофический сход грунта на оползневом склоне берега р. Бурья 11 декабря 2018 г. привлёк большое внимание специалистов и исследователей (Крамарева и др., 2018, 2019). Длина поверхности скольжения оползня составила около 800 м, ширина — около 400 м, объём вынесенного грунта оценён величиной 18,5 млн м³ (Захарова и др., 2019; Остроухов и др., 2019). Одним из главных нерешённых вопросов остаётся выяснение причин схода оползня и времени начала подвижек грунта.

Для исследования таких процессов перспективно использование съёмки из космоса (Бондур, 2010) и обработки аэрокосмических изображений (Бондур, Старченков, 2001). Одним из результативных методов дистанционного зондирования оползневых явлений и анализа свойств растительных покровов является радиолокационная съёмка (Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019; Захарова и др., 2019).

Задачу дистанционного измерения смещений поверхности часто удаётся решать с помощью метода дифференциальной интерферометрии (Bamler, Hartl, 1998). Первые результаты исследования Бурейского оползня интерферометрическим методом были проведены по данным европейского радара с синтезированной апертурой C-диапазона Sentinel-1, начало съёмок которого по этому району приходится на лето 2016 г. (Захарова, Захаров, 2019). Они показали,

что ещё зимой 2016/2017 гг. можно было наблюдать вертикальные смещения почв на береговом склоне величиной около 3,5 см/мес в направлении вниз по склону. Наблюдение подвижек почвы покрытого древесной растительностью склона на снимках Sentinel-1 в осенне-весенний период, а также летом оказалось невозможным из-за высокой временной декорреляции эхо-сигналов этого радара с длиной волны 5,6 см. Более подходящим инструментом, данные которого устойчивее к временной декорреляции, являются радары более длинноволнового L-диапазона. Используемые нами в настоящей работе снимки японского космического радара PALSAR-1 (длина волны 24 см) доступны для анализа начиная с лета 2006 г., когда водохранилище ещё только заполнялось водой. Снимки радара PALSAR-2 (также 24 см) доступны с осени 2014 г. по настоящее время.

Последствия процесса заполнения водохранилища с апреля 2003 г. хорошо заметны на серии оптических снимков сервиса Google Планета Земля (*англ.* Google Earth) в виде уширения реки и затопления русел её притоков. Вследствие подъёма воды ширина реки в районе оползневого склона выросла за три года с 200 до 400 м, а каньонное русло ручья Средний Сандар, впадающего в Бурью напротив места оползня, оказалось затоплено на расстояние 1,6 км вверх по течению. Судя по цифровым моделям рельефа SRTM и TanDEM-X, уровень воды в устье ручья поднялся не менее чем на 60 м. Водоохранилище Бурейской ГЭС впервые было заполнено до проектной отметки летом 2009 г., при этом общая длина водохранилища достигла 230 км. Поскольку отрезок реки в районе оползня является частью водохранилища, сезонные колебания уровня воды в водохранилище порядка 16–19 м наблюдаются и здесь, они являются причиной обезлесения в узкой прибрежной полосе на береговых склонах и, вероятно, причиной развития оползневого процесса на береговых склонах.

Архивы Японского космического агентства JAXA содержат 22 сцены радара PALSAR-1 и 13 сцен PALSAR-2, пригодных для интерферометрической обработки с целью выявления мелкомасштабных подвижек тела оползня задолго до катастрофического события. Благодаря длине волны сигнала этих радаров 24 см наблюдается более высокая временная стабильность отражений по сравнению с С-диапазоном, вследствие чего из снимков, полученных в зимнее время года, можно составлять пригодные для обработки интерферометрические пары с интервалом до 2–3 лет. При этом летние снимки заметно реже подходили для анализа из-за значительной временной декорреляции эхо-сигналов, вызванной сильными дождями незадолго или во время съёмки. После обработки и анализа отобранных 44 пар изображений информативными оказались только 12 интерферограмм.

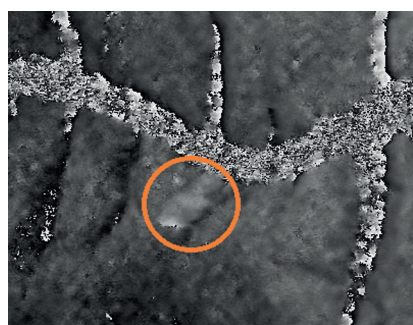


Рис. 1. Фрагмент летней интерферограммы 15.06.2016–13.07.2016, содержащий зону оползня

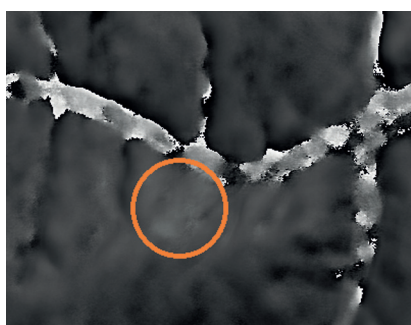


Рис. 2. Фрагмент зимней интерферограммы 13.01.2009–28.02.2009

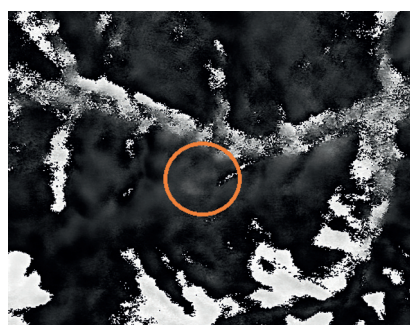


Рис. 3. Фрагмент летней интерферограммы 16.05.2006–01.10.2006

На рис. 1 приведена летняя интерферограмма с интервалом между съёмками 28 дней (15.06.2016–13.07.2016). На тёмном фоне суши ярко выделяется зашумленная полоса реки с тремя крупными северными притоками и одним южным. Оползневая зона, находящаяся на противоположном берегу от устья ручья Средний Сандар, хорошо заметна в виде вытянуто-

го светлого пятна по сравнению с окружающим более тёмным фоном и заключена в оранжевое кольцо. В принятой схеме обработки удаление отражающей поверхности за время между съёмками приводит к увеличению разности фаз, переданному светлыми тонами на интерферограмме. Неоднородная яркость пятна может свидетельствовать о более высокой скорости движения в верхней части оползня, вблизи будущей стенки отрыва. На этой интерферограмме радиальная скорость поверхности меняется в пределах оползневой зоны от 2 до 4 см за 28 дней, что в пересчёте на смещение вдоль склона даёт до 10,7 см/мес. Это заметно больше, чем спустя полгода зимой по данным Sentinel-1: 0,6 см за 12 дней (Захарова, Захаров, 2019), т. е. 3,4 см/мес по склону.

Анализ более ранних снимков (2006–2010) показывает, что зимние интерферограммы даже с большим, чем летом 2016 г., интервалом между съёмками свидетельствуют о весьма слабой подвижности оползня, что может быть объяснено как более ранней стадией развития оползневого процесса, так и большей стабильностью замёрзшего грунта. Так, на *рис. 2* (см. с. 114) показана интерферограмма 13.01.2009–28.02.2009, где максимальная разность фаз на теле оползня с усреднённым окружающим фоном составляет 0,6 рад, что соответствует радиальному смещению менее чем 1,2 см за 46 дней (1,8 см/мес вдоль склона). На летней (май–октябрь) интерферограмме периода 16.05.2006–01.10.2006 по данным PALSAR-1 (*рис. 3*, см. с. 114) имеется чуть более заметное радиальное смещение с амплитудой до 2 см за 92 дня (1,6 см/мес по склону), что в 6 раз меньше максимальной скорости смещений летом 2016 г.

Гораздо более заметен эффект, накопленный на интервале порядка года и более. На *рис. 4* показана интерферограмма для пары снимков 08.01.2007–28.02.2009. Здесь смещения таковы, что происходит заворот значений фазы, и на интерферограмме в районе оползня, в отличие от *рис. 1–3*, появляется линия перехода через 2π — резкая граница чёрного и белого. В нижней части оползня радиальное смещение составляет около 8 см, в верхней — 14 см за два года, максимальная скорость вдоль склона — 1,3 см/мес. Близкие к приведённым скорости получены для двухлетних пар 11.01.2008–16.01.2010 и 26.02.2008–03.03.2010 (1,5 и 1,9 см/мес вниз по склону).

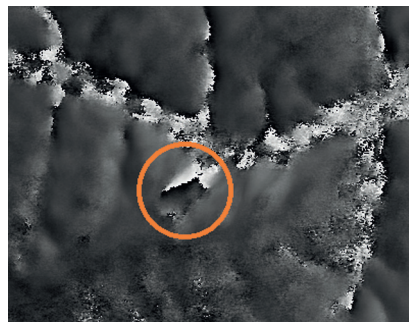


Рис. 4. Фрагмент интерферограммы с двухлетним интервалом 08.01.2007–28.02.2009



Рис. 5. Фрагмент интерферограммы с годичным интервалом 22.06.2015–20.06.2016

По данным обработки интерферометрической пары 22.06.2015–20.06.2016 радара PALSAR-2 (*рис. 5*) максимальная радиальная скорость в 2016 г. достигала 23 см за год в верхней части оползня (4,7 см/мес вниз по склону). Пара, в которой каждое изображение получено месяцем позже (15.07.2015 — 13.07.2016), даёт близкое значение 4,9 см/мес.

На *рис. 6* (см. с. 116) показаны значения смещений для всех упомянутых пар данных, измеренных по соответствующим интерферограммам, в пересчёте на смещение вдоль оползневой склона за 30 дней. Треугольными маркерами отмечены смещения в верхней части оползня, где наблюдаются максимальные значения смещений, квадратные маркеры соответствуют области в средней части оползня, более медленной.

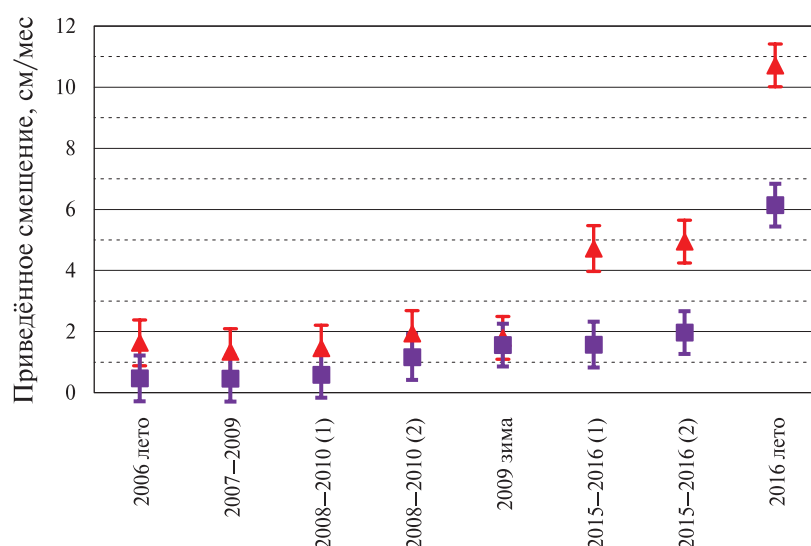


Рис. 6. Величины смещения на интерферограммах PALSAR (2006–2010) и PALSAR-2 (2015–2016), приведенные к сантиметрам в месяц, в направлении вниз по склону

Для оценки точности полученных смещений был проведен анализ шумов на интерферограмме, который можно сравнить с теоретическими значениями точностей (Zebker, Villasenor, 1992), а также с результатами, полученными другими исследователями при оценке смещений поверхности с помощью радиолокатора PALSAR (Sandwell et al., 2008).

Необходимо учесть, что с целью снижения фазовых шумов при построении интерферограммы выполнялось усреднение в окне 2×4 по дальности и азимуту и последующая фильтрация методом Голдстина (Goldstein, Werner, 1998) с эффективным размером окна сглаживания 5×5 . Непосредственное измерение шумов на фрагменте интерферограммы по оползнию с итоговым некогерентным накоплением $8 \times 25 = 200$ даёт значение СКО фазы 0,1 рад, что соответствует радиальному смещению 0,2 см. В пересчёте на наиболее вероятное направление смещения вниз по склону это составляет 0,5 см.

Теоретическую оценку ошибок измерения можно получить исходя из значений когерентности эхо-сигналов рассеивающей поверхности. Поскольку при интерферометрической схеме съёмке с повторяющихся орбит для поверхностей, покрытых растительностью, ключевым параметром, влияющим на информативность фазовых измерений, является временная декорреляция сигналов, оценка точностей измерения смещений проводится на основе значений интерферометрической когерентности, отражающей степень декорреляции. При уровне когерентности в приведённых парах на области измерения лучше 0,4 и указанном выше усреднении точность измерения фазы, согласно модельной зависимости из (Krieger et al., 2007; Zebker, Villasenor, 1992), составляет менее 10 угл. град, что соответствует радиальному смещению 0,3 см (аналогичный результат 3 мм, полученный непосредственно по данным PALSAR, опубликован в (Sandwell et al., 2008)). Эта величина в пересчёте на смещение вдоль склона соответствует 0,75 см.

Указанные значения ошибок (0,5 см при оценке фазовых шумов и 0,75 см согласно модели) позволяют заключить, что точность измерения смещений не хуже 0,75 см, пределы погрешностей показаны на рис. 6 вертикальными отрезками вокруг измеренных значений.

Различия между скоростью смещения в парах, полученных радиолокатором PALSAR в 2006–2010 гг. для промежутков от 46 до 782 дней, незначительны в обеих областях измерения. Скорости же, полученные по данным PALSAR-2 в 2015–2016 гг., заметно выше для верхней части оползня; максимальная скорость наблюдается летом 2016 г., она превышает 10 см/мес и приближается к значениям, полученным по данным Sentinel-1 в начале зимы 2017–2018 гг. (Захарова, Захаров, 2019): 7 см за 12 дней, или 17 см/мес в направлении вниз по склону. Летом 2016 г. смещения в средней части оползня также активизируются.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что скорость движения оползня, как правило, летом выше, чем зимой. Наименьшая измеренная скорость движения в самой активной части оползня отмечена для начала периода наблюдения в 2006 г. Максимальное радиальное смещение 23 см за год зафиксировано в конце цикла наблюдений PALSAR-2, ближе к моменту схода оползня. Вероятным триггером оползневой процесса является заполнение водохранилища, рабочий уровень воды в котором был достигнут в 2009 г.

Литература

1. Бондур В. Г. Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
2. Бондур В. Г., Старченков С. А. Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Изв. высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
3. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. (2008а) Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Изв. высших учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 5. С. 9–14.
4. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н. (2008б) Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Изв. высших учеб. заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 6. С. 64–73.
5. Бондур В. Г., Чимитдоржиев Т. Н., Дмитриев А. В., Дагуров П. Н. Оценка пространственной анизотропии неоднородностей лесной растительности при различных азимутальных углах радарного поляриметрического зондирования // Исследование Земли из космоса. 2019. № 3. (В печати.)
6. 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.
7. 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.
8. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амельченко Ю. А., Буцнев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурей 11 декабря 2018 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
9. Крамарева Л. С., Лупян Е. А., Амельченко Ю. А., Буцнев М. А., Крашенинникова Ю. С., Суханова В. В., Шамилова Ю. А., Бородицкая А. В. Наблюдение за ходом взрывных работ и устройством прорана в зоне схода скальных пород на реке Бурей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 259–265.
10. 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.
11. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V. 14. P. R1–R54.
12. Goldstein R. M., Werner C. L. Radar interferogram filtering for geophysical applications // Geophysical Research Letters. 1998. V. 25. No. 21. P. 4035–4038.
13. Krieger G., Moreira A., Fiedler H. TanDEM-X: A Satellite Formation for High Resolution SAR Interferometry // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2007. V. 45. No. 11. P. 3317–3341.
14. Sandwell D. T., Myer D., Mellors R., Shimada M., Brooks B., Foster J. Accuracy and Resolution of ALOS Interferometry: Vector Deformation Maps of the Father's Day Intrusion at Kilauea // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2008. V. 46. No. 11. P. 3524–3534.
15. Zebker H. A., Villasenor J. Decorrelation in interferometric radar echoes // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 1992. V. 30. No. 5. P. 950–959.

Long-term monitoring of the landslide process on Bureya riverbank based on interferometric L-band radar data

V. G. Bondur¹, L. N. Zakharova², A. I. Zakharov²,
T. N. Chimitdorzhiev³, A. V. Dmitriev³, P. N. Dagurov³

¹ *Research Institute of Aerospace Monitoring "Aerocosmos", Moscow 105064, Russia
E-mail: vgbondur@ aerocosmos.info*

² *V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: ludmila@sunclass.ire.rssi.ru*

³ *Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude 670047, Russia
E-mail: tchimit@gmail.com*

In this paper, the results of interferometric processing and analysis of Japanese spaceborne PALSAR-1 and PALSAR-2 L-band radar images covering the area of the Bureya River with landslide famous for the catastrophic landfall in December 2018 are presented. Available archival radar images cover the observation intervals of 2006–2011 and 2014 – now; they allow studying long-term dynamics of this landslide evolution. Thanks to relatively high temporal stability of scattering properties of the surface in L frequency band, it is possible to detect the displacements of the landslide surface and to measure total amplitudes of displacements over time intervals up to 2 years. According to our estimations, the velocities of summer displacements are typically higher than wintertime ones. The displacements are low in 2006–2010 (1.6–1.9 cm/month), then they increase significantly in 2015–2016 (4.7–4.9 cm/month), the maximal measured velocity in summer 2016 reaches 10.7 cm/month. It is likely that the activation of the landslide process corresponds to the time of completion of the reservoir filling in 2006–2009, and it is provoked by both the initial rising and seasonal oscillations of the water level.

Keywords: Bureya, radar, PALSAR, radar interferometry, estimation of surface displacements, landslide, reservoir

Accepted: 06.09.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-119

References

1. Bondur V. G., Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, Vol. 47, No. 9, pp. 1007–1018.
2. Bondur V. G., Starchenkov S. A., Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazhenii (Methods and programs of aerospace imagery processing and classification), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2001, No. 3, pp. 118–143.
3. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N. (2008a), Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti (Texture analysis of radar images of vegetation), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2008, No. 5, pp. 9–14.
4. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N. (2008b), Distsionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami (Remote sensing of vegetation by optical microwave methods), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2008, No. 6, pp. 64–73.
5. Bondur V. G., Chimitdorzhiev T. N., Dmitriev A. V., Dagurov P. N., Otsenka prostranstvennoi anizotropii neodnorodnostei lesnoi rastitel'nosti pri razlichnykh azimutal'nykh uglakh radarnogo polyarimetricheskogo zondirovaniya (Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at various azimuth angles of the radar polarimetric sensing), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2019, No. 3, in print.
6. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Nablyudenie dinamiki zony opolznaya na reke Bureya po dannym interferometricheskoi s'emki Sentinel-1 v 2017–2018 gg. (Interferometric observation of landslide area dynamics on the Bureya River by means of Sentinel-1 radar data in 2017–2018), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 273–277.
7. Zakharova L. N., Zakharov A. I., Mitnik L. M., Pervye rezul'taty radiolokatsionnogo monitoringa posledstviya 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.
8. 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.
 9. 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 работ 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.
 10. Ostroukhov A.V., Kim V.I., Makhinov A.N., Otsenka morfometricheskikh parametrov opolznia na Bureiskom vodokhranilishche i ego posledstviu 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.
 11. Bamler R., Hartl P., Synthetic aperture radar interferometry, *Inverse Problems*, 1998, Vol. 14, pp. R1–R54.
 12. Goldstein R.M., Werner C.L., Radar interferogram filtering for geophysical applications, *Geophysical Research Letters*, 1998, Vol. 25, No. 21, pp. 4035–4038.
 13. Krieger G., Moreira A., Fiedler H., TanDEM-X: A Satellite Formation for High Resolution SAR Interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2007, Vol. 45, No. 11, pp. 3317–3341.
 14. Sandwell D.T., Myer D., Mellors R., Shimada M., Brooks B., Foster J., Accuracy and Resolution of ALOS Interferometry: Vector Deformation Maps of the Father's Day Intrusion at Kilauea, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, Vol. 46, No. 11, pp. 3524–3534.
 15. Zebker H.A., Villasenor J., Decorrelation in interferometric radar echoes, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, Vol. 30, No. 5, pp. 950–959.