

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ СОСТОЯНИЯ ОПОЛЗНЕВОЙ ЗОНЫ НА РЕКЕ БУРЕЯ
В 2018–2019 ГОДАХ ПО РАДИОЛОКАЦИОННЫМ И ОПТИЧЕСКИМ
КОСМИЧЕСКИМ ИЗОБРАЖЕНИЯМ

© 2019 г. В. Г. Бондур^{1,*}, Л. Н. Захарова^{1,2,**}, А. И. Захаров^{1,2}

¹ Научно-исследовательский институт аэрокосмического мониторинга «АЭРОКОСМОС», Москва

² Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, Фрязино

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

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

Поступила в редакцию 09.12.2019 г.

Приведены результаты мониторинга текущего состояния оползневой зоны на реке Бурья в 2018–2019 гг. по изображениям, полученным с помощью радаров с синтезированной апертурой и оптических датчиков многоспутниковой системы Sentinel. Методы дифференциальной радарной интерферометрии позволили выявить стабильность поверхности оползневого склона в первые четыре месяца после обвала, а также с конца июля 2019 г. Выявлена мелкомасштабная динамика поверхности в пределах оползневого цирка. Показано, что радиоинтерферометрические методы непригодны для наблюдения крупномасштабных изменений береговой линии в отличие от оптических снимков, где эффекты обрушения фрагментов берега и его затопления оказались хорошо видны, в том числе и по сравнению с амплитудными радарными изображениями. С использованием космических изображений выявлена продолжающаяся оползневая активность в пределах оползневого цирка и обрушения береговой линии. Это требует организации непрерывного мониторинга данной и других опасных оползневых зон на Бурее.

Ключевые слова: Бурья, дистанционное зондирование, многоспутниковая система, оптические изображения, радар с синтезированной апертурой, радиолокационные изображения, радиолокационная интерферометрия, оползень, смещения поверхности

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019626-35>

ВВЕДЕНИЕ

В связи с непрерывным ростом количества природных катастроф и ущерба, наносимого ими (Бондур и др., 2009; Природные опасности..., 2000), актуальными становятся разработка и широкое применение новых методов мониторинга и прогнозирования таких природных явлений, как землетрясения (Акопян и др., 2017; Бондур, Зверев, 2005а, б, 2007; Бондур и др., 2007; Бондур, Смирнов, 2005), наводнения (Бондур и др., 2009; Природные опасности..., 2000), тайфуны (Бондур и др., 2008а, б; 2009), природные пожары (Бондур, 2015; Бондур, Гинзбург, 2016; Бондур и др., 2016), оползни (Бондур и др., 2019а, б, д; Захарова и др., 2019; Захаров, Захарова, 2019; Захарова, Захаров, 2019; Крамарева и др., 2018, 2019) и др.

Для решения таких задач эффективно применение космических методов дистанционного зондирования, прежде всего всепогодных радиолокационных методов, а также в их сочетании с оптическими методами (Бондур, 2010; Бондур и др., 2009; 2019а, б, с, д; Захаров, Захарова, 2019; Захарова, Захаров, 2019; Захарова и др., 2019;

Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Бондур и др., 2019с; Бондур, Старченков, 2001; Bamler, Hartl, 1998; Colesanti, Wasowski, 2006).

Настоящая работа посвящена применению методов дистанционного зондирования для мониторинга оползневых процессов на реке Бурья, происходивших в 2019 г. после схода оползня в декабре 2018 г.

Катастрофический сход оползня на берегу реки Бурьи, произошедший 11 декабря 2018 года, перекрыл русло реки Бурьи и потребовал не только немедленных действий по устранению завала, который представлял опасность, связанную с затоплением и повреждением населенных пунктов и хозяйственной инфраструктуры, но и организации мониторинга оползневой зоны с целью выяснения истории и современной динамики этого опасного природного явления.

Проводившиеся с начала 2019 года наземные экспедиционные исследования позволили получить представление о масштабах оползня (Перерва и др., 2019). Они были неопределимы при организации и проведении работ по пробивке прорыва в русле реки в конце января–начале февраля

2019 г. Однако качественно новые и детальные сведения о состоянии оползневой зоны, истории развития и современной динамике оползня могут быть получены только в ходе спутниковых оптических и радиолокационных наблюдений.

Первые сведения о масштабах события, связанного со сходом оползня на реке Буря, были получены благодаря оптическому изображению, полученному с борта спутника Sentinel-2B 12 декабря 2018 г. в 02:22 GMT (Крамарева и др., 2018). По представленному космическому изображению была выявлена зона обрушения и образовавшаяся в результате насыпь, перегородившая русло реки. Были выявлены также зоны повреждения прибрежного лесного покрова волной, сформировавшейся в результате схода грунта в воду. Динамика создания прорана в завале с использованием взрывных работ в конце января — начале февраля 2019 г. и его размыва половодьем вплоть до конца апреля 2019 г. наблюдалась по данным оптической съемки со спутников Sentinel-2 и Международной космической станции (Крамарева и др., 2019, Остроухов и др., 2019).

Радиолокационные изображения с борта спутников Sentinel-1 для наблюдения оползневой активности зимой 2017–2018 гг. впервые были применены в работе (Захарова, Захаров, 2019). В работе (Захарова и др., 2019) был проведен анализ последствий схода оползня, в том числе оценка его размеров, объема вынесенного грунта, а также стабильности оползневой зоны в течение зимы 2019 года. Радиолокационные изображения, полученные с борта спутников ALOS-1 и ALOS-2, позволили наблюдать с помощью технологии радарной интерферометрии развитие оползневого процесса в период с 2006 по 2017 гг. (Бондур и др., 2019а, б).

В настоящей работе приводятся результаты мониторинга состояния оползневой зоны на реке Буря по данным оптической и радиолокационной съемки с борта спутников Sentinel-1A, B и Sentinel-2A, B.

ОСОБЕННОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ СЪЕМКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Используемые в настоящей работе космические изображения были получены с борта семейства спутников Sentinel, которые находятся на солнечно-синхронной орбите с высотой 798 км и разнесением в плоскости орбиты на 180°.

Многоспутниковая система Sentinel создана Европейским космическим агентством в рамках проекта глобального космического мониторинга

"Copernicus". Оптическая съемка проводится в 13-ти спектральных диапазонах в полосе 443–2190 нм с разрешением 10/20/60 м с зоной захвата 290 км (http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf). На широте оползневой зоны интервал между повторными съемками составляет 2–3 дня.

Спутники Sentinel-1A и Sentinel-1B обеспечивают проведение радиолокационной съемки земной поверхности радаром с синтезированной апертурой (РСА) в С-диапазоне (длина волны 5.6 см) с солнечно-синхронной орбиты высотой 693 км. Южная часть территории Дальневосточного федерального округа России, где находится река Буря, снимается на нисходящем витке с периодом точного повторения орбиты 12 дней в режиме IW (interferometric wide), пригодном для интерферометрических измерений рельефа и анализа динамики подстилающей поверхности. Съемка выполняется справа по ходу полета спутника в широкозахватном режиме с шириной полосы захвата 240 км. Расстояние между пикселями синтезированного радарного изображения по наклонной дальности в формате SLC составляет 2.3 м, а между строками — 14.1 м (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>).

В данной работе использованы серии космических радиолокационных изображений, полученных с условных орбит 61 и 134.

Оптические снимки, полученные с борта спутников Sentinel-2A, B, более удобны для наблюдения крупномасштабных изменений рельефа из-за лучшего пространственного разрешения, отсутствия характерных для РСА спекл-шумов, привычности оптического изображения для визуального восприятия.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведены фрагменты оптических изображений, полученных с борта спутников Sentinel 2A и 2B в период времени с 12 декабря 2018 г. по 26 июля 2019 г.

На рис. 1а приведен фрагмент оптического космического изображения оползневой зоны, полученного 12 декабря 2018 г. с борта спутника Sentinel-2, вскоре после обрушения. Здесь из-за низкого зимнего солнца русло реки и зона обрушения трудно различимы в тени высокого южного берега. Основные изменения на земной поверхности, наблюдавшиеся после схода оползня, выделяемые на космических оптических изображениях — это:

— формирование прорана с помощью взрывов в конце января — начале февраля 2019 г. (указан стрелкой на рис. 1б);

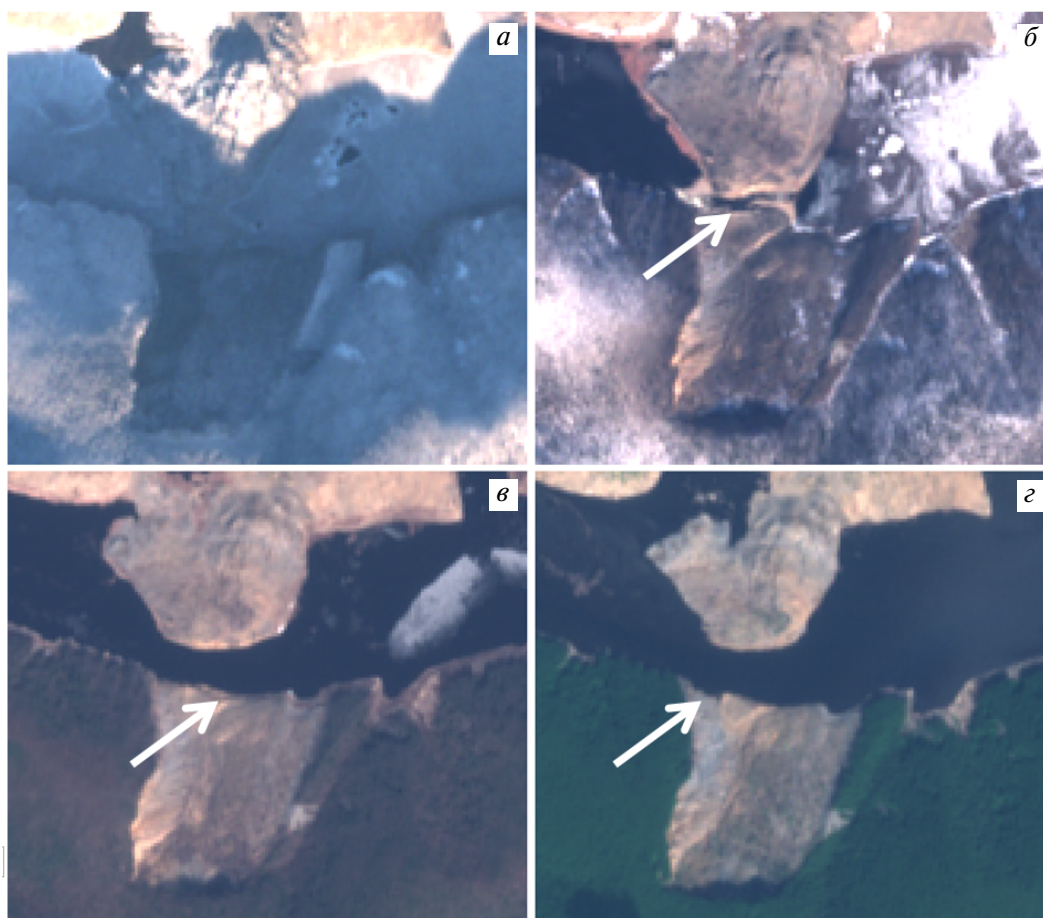


Рис. 1. Оптические снимки спутника Sentinel-2 зоны Бурейского оползня.

— обрушение/затопление стенок прорана в апреле 2019 г. во время половодья;

— крупномасштабное обрушение береговой линии в период с 3 по 11 мая 2019 г. (стрелка на рис. 1б);

— затопление части прибрежной территории оползневой зоны из-за подъема уровня воды в реке в период с 21 по 26 июля 2019 г. (стрелка на рис. 1г).

Проведение мониторинга с повторяющихся орбит спутников Sentinel-1 с использованием радиоинтерферометрического метода позволяют обнаруживать мелкомасштабные (порядка длины волны радиолокатора) деформации подстилающей поверхности, произошедшие за время между съемками. Когерентность отраженных сигналов сеансов радиолокационной съемки, составляющих интерферометрическую пару, является ключевым условием успешного выявления и измерения смещений земной поверхности по разности фаз на интерферограмме (Захаров, Захарова, 2019).

Недостатком радиоинтерферометрических наблюдений земной поверхности с развитой лесной

растительностью с помощью PCA Sentinel-1 (С-диапазон) является высокая степень временной декорреляции отраженных в соседних съемках в теплое время года (Бондур и др., 2019с; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б). Измерение высот рельефа и наблюдения подвижек лесных покровов в этом диапазоне волн оказывается возможным лишь в условиях отрицательной температуры воздуха из-за большей временной стабильности диэлектрических свойств замерзшей кроны дерева (Захаров, Захаров, 2019).

Особенностью наблюдений оползневой зоны в 2019 г. является отражение радиоволн поверхностью, свободной от растительности, что показано в работе (Бондур и др., 2019а). Благодаря этому когерентность сигналов здесь выше, чем у окружающей залесенной поверхности.

На рис. 2 приведены графики когерентности для зон оползня и близлежащего леса за период времени с 16.11.2018 по 05.10.2019. Интервал между съемками пар радарных изображений обусловлен 12-дневным периодом точного повторения орбиты спутника. Даты по горизонтальной оси приведены в формате годы–месяцы–дни.

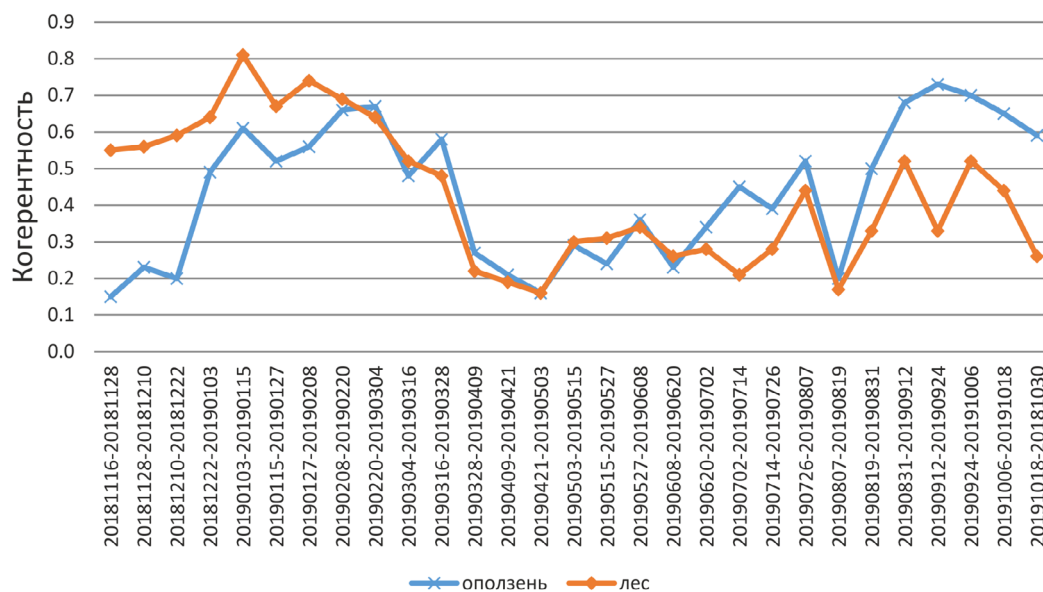


Рис. 2. Когерентность эхо-сигналов от зоны оползня и близлежащего лесного массива за период времени с 16.11.2018 по 05.10.2019.

Высокая когерентность отражений от лесного участка вплоть до конца марта 2019 г. объясняется высокой стабильностью его диэлектрических свойств при отрицательной температуре воздуха (Бондур и др., 2019с; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б). Необходимо отметить, что крупномасштабные смещения фрагментов поверхности с амплитудой более половины длины волны в пределах пиксела изображения приводят к декорреляции отраженных сигналов этих пикселей изображений интерферометрической пары (Бондур и др., 2019с).

Таким образом, низкая когерентность отраженных радиоволн для оползневой зоны вплоть до 12 декабря 2018 г. может быть объяснена резкой активизацией сравнительно крупномасштабных подвижек поверхности оползня перед обрушением. Когерентность отраженных радиоволн поверхности оползня в апреле — начале мая 2019 г. низка из-за периода таяния снега и изменения влажности почвы на южном береговом склоне. Необычно частые и сильные дожди в мае–июне, интенсивность которых упала лишь к началу июля 2019 г. (Перерва и др., 2019), также могли быть причиной низкой когерентности и неэффективности интерферометрических наблюдений в эти месяцы. Низкая когерентность интерферометрической пары 7.08.2019–19.08.2019 (см. рис. 2) также объясняется интенсивными осадками, в данном случае непосредственно перед первой съемкой (www.rp5.ru).

На рис. 3 дан набор некоторых карт когерентности радиолокационных сигналов в пределах оползневой зоны в весенне-летний период 2019 г. Светлые тона соответствуют более высокой когерентности. Высокая когерентность радиолокационных сигналов, характерная для северного берега реки Буреи, в том числе вдоль берегов реки Средний Сандар, объясняются более высокой стабильностью открытой поверхности прибрежной зоны, где в декабре 2018 г. растительность была снесена цунамиподобной волной. Благодаря постепенному высыханию почвы оползневого цирка когерентность радиолокационных сигналов стала расти, вследствие чего начиная с июля 2019 г. появилась возможность поиска признаков мелкомасштабных подвижек поверхности методами радарной интерферометрии.

Поиск мелкомасштабной динамики на поверхности цирка Бурейского оползня с конца 2018 г., сразу после обвала, с помощью технологии дифференциальной радарной интерферометрии был предметом исследования в работе (Захарова и др., 2019). Как известно, интерферометрическая фаза на радарной интерферограмме зависит, в первую очередь, от вариаций высот рельефа (так называемая топографическая фаза), а также от локальных смещений отражающей поверхности за время между съемками интерферометрической пары (Bamler, Hartl, 1998). При наличии цифровой модели рельефа (ЦМР) можно компенсировать влияние топографической фазы, выделив

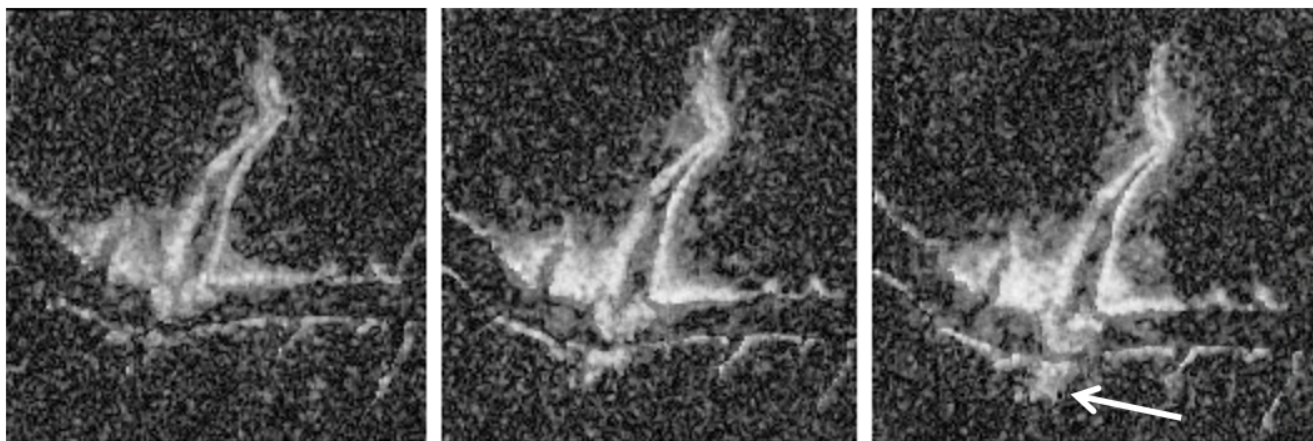


Рис. 3. Когерентность радиолокационных сигналов для участка земной поверхности в мае, июне и июле 2019 года. Стрелкой указана оползневая зона.

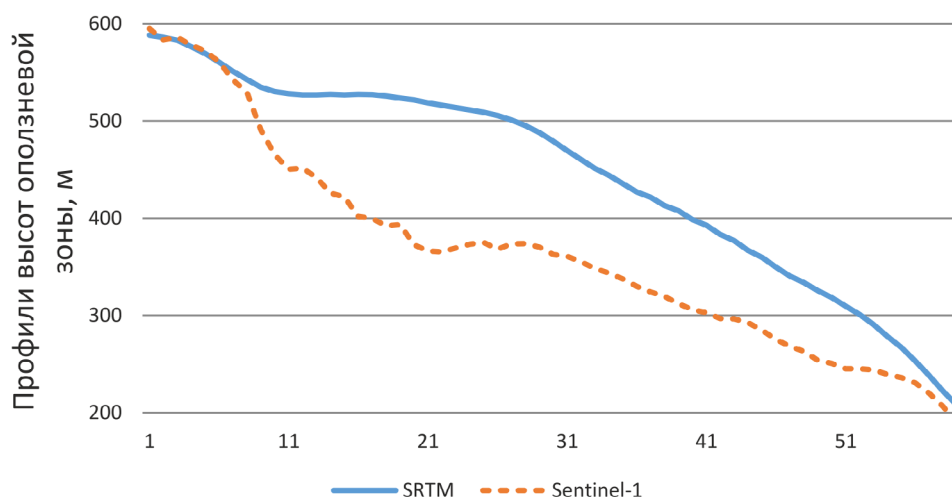


Рис. 4. Профиль высот по данным SRTM (сплошная линия) и по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 (пунктирная линия).

фазовые смещения на интерферограммах, обусловленные динамикой отражающей поверхности.

Для построения дифференциальных интерферограмм по данным спутников Sentinel-1 была использована ЦМР SRTM, которая достаточно хорошо описывает рельеф всей сцены радарного снимка за исключением оползневой зоны, где ландшафт изменился.

На рис. 4 приведен профиль высот поверхности оползневой зоны вдоль по склону, построенный по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в январе 2019 г. (пунктирная линия), и профиль, извлеченный из ЦМР SRTM (сплошная линия). По вертикальной оси отложена высота над уровнем моря в метрах, по горизонтальной — номер отсчета профиля (пиксела). Расстояние между пикселами на поверхности составляет около 14 м.

Максимальное отличие истинной высоты поверхности от высоты по данным ЦМР SRTM достигает 150 м. Такого рода ошибки высот рельефа могут быть ложно интерпретированы как подвижки поверхности довольно большой амплитуды. Эта топографическая фаза, порожденная отличием ЦМР SRTM от истинного рельефа поверхности, была компенсирована в фазовых измерениях несколькими способами, описанными в работе (Захаров, Захарова, 2019).

По результатам анализа непрерывной серии из восьми 12-дневных дифференциальных интерферограмм для интервала времени с конца декабря 2018 г. по начало апреля 2019 г., не выявлена никакая-либо динамика поверхности оползневой зоны, как в пределах цирка, так и на близлежащих склонах. Взрывные работы, выполненные в третьей декаде января—первой декаде февраля 2019 г.,

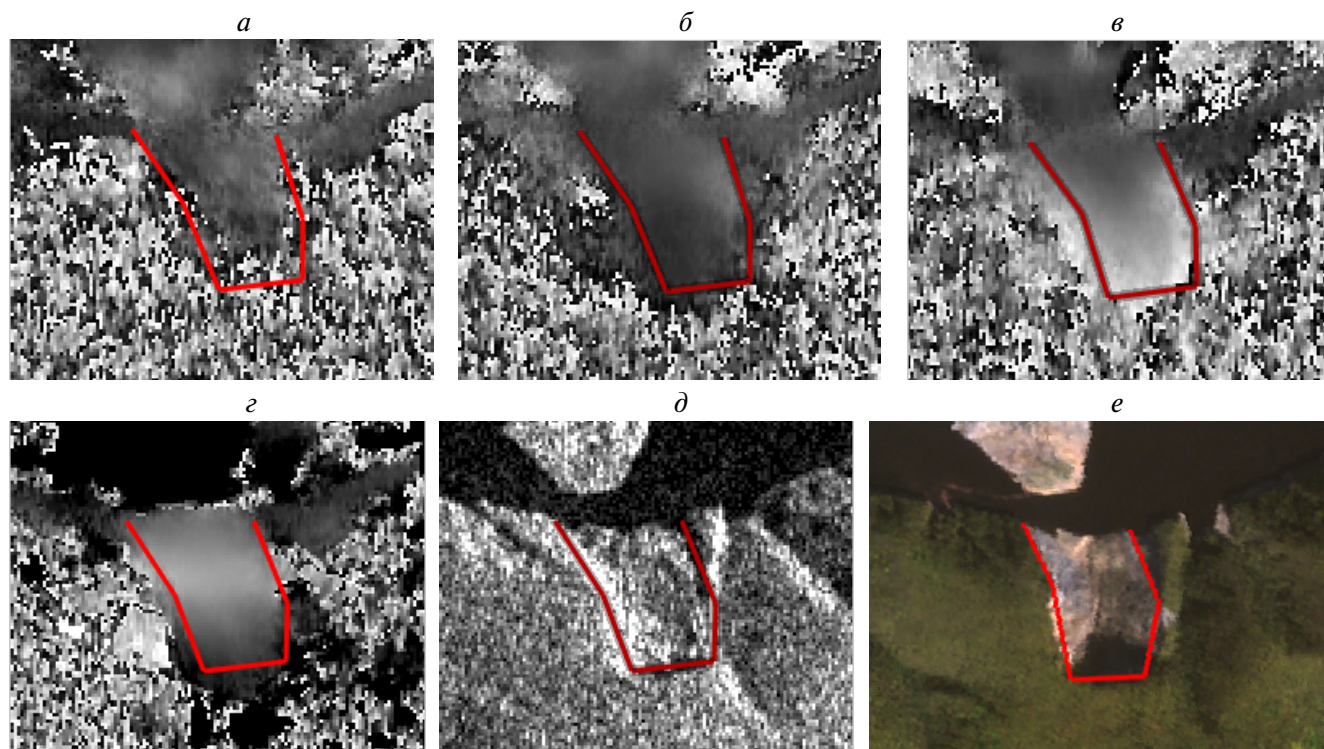


Рис. 5. Примеры интерферограмм (а–с) и космических изображений (д, е) для оползневой зоны по данным съемки РСА Sentinel-1 в третьем квартале 2019 г. с контуром оползневой зоны: а — 09.07.2019–21.07.2019; б — 26.08.2019–07.09.2019; в — 07.09.2019–19.09.2019; г — 19.09.2019–01.10.2019; д — радиолокационное изображение, полученное 19.09.2019; е — оптическое изображение, полученное 25.09.2019.

также не привели к сколь-нибудь заметным (более 1–2 мм) смещениям грунта на оползневом склоне.

Примеры интерферограмм с просадками поверхности, а также соответствующие им фрагменты радарного и оптического изображений приведены на рис 5. В принятой здесь технологии интерферометрической обработки более светлые тона в пределах оползня соответствуют удалению отражающей поверхности от спутника вниз по оползневому склону.

На первых после трехмесячного периода низкой когерентности интерферограммах, построенных по июльским космическим радиолокационным изображениям (рис. 5а), сложно говорить о характере смещений ввиду зашумленности фазового изображения, особенно в верхней части оползневого цирка (южный его край).

Надежно измеряемые признаки подвижек каменной осыпи на поверхности цирка с максимальной амплитудой радиального смещения 0.7 см были обнаружены в середине восточной части оползня в конце августа 2019 г. (рис. 5б). На рис. 5в отмечается смещение грунта по всему восточному краю оползня и вблизи стенки отрыва. На рис. 5г видна широкая светлая полоса, отмечающая смещение в средней части оползня (в районе пикселей 26–31 профиля, приведенного на рис. 4). Эта

полоса пересекает всю зону оползневого цирка от ее западного края до восточного.

В табл. 1 приведено подробное описание результатов наблюдений мелкомасштабной динамики поверхности в пределах оползневого цирка на реке Буря с июля по середину октября 2019 г.

Анализ табл. 1 позволяет отметить нерегулярность процессов смещения поверхности цирка как во времени, так и по положению. В июле–августе 2019 г. чаще всего встречаются смещения на восточном крае оползневого цирка с амплитудой до 1.5 см по линии визирования. Далее следует нарастание динамики в верхней части цирка (пиксели 6–16 профиля высот на рис. 4) с середины сентября 2019 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов применения космических, радиолокационных и оптических изображений для мониторинга оползневой зоны на Буре в 2018–2019 гг., продемонстрирована высокая информативность методов дистанционного зондирования из космоса, позволяющих выявлять мелкомасштабную динамику земной поверхности в зоне оползня. С использованием радиоинтерферометрического метода выявлена стабильность

Таблица 1. Наблюдаемые смещения поверхности в пределах оползневого цирка на реке Буря в июле—октябре 2019 г.

Даты	Максимальное радиальное смещение за 12 дней	Положение максимального смещения
09.07.2019—21.07.2019	0.5 см	Восточный край, середина—низ
21.07.2019—02.08.2019	1.4 см	Восточный край, середина—низ
02.08.2019—14.08.2019	0.7 см	Восточный край, середина—низ
14.08.2019—26.08.2019	0.4 см	Восточный край
26.08.2019—07.09.2019	0.5 см	Восточный край, середина
07.09.2019—19.09.2019	1.9 см	Восточный край и стенка отрыва
19.09.2019—01.10.2019	1.4 см	Полоса в средней части
01.10.2019—13.10.2019	1.5 см	Верхняя часть оползня

поверхности оползневого цирка и соседних береговых склонов в начале 2019 г., в том числе во время проведения взрывных работ по пробивке прорана.

Радарные интерферометрические наблюдения, полученные с борта спутников Sentinel-1, оказались непригодны для наблюдения локальных обрушений береговой линии, в отличие от оптических изображений, полученных со спутников Sentinel-2, где эффекты обрушения фрагментов берега и его затопления хорошо видны.

Первые признаки подвижек фрагментов скальных осыпей на поверхности скольжения в разных частях оползневого цирка были обнаружены в конце июля 2019 г. Подвижки продолжались до конца периода наблюдений (середина октября 2019 г.). Не выявлено крупномасштабных смещений/обрушений в пределах цирка, которые приводили бы к потере интерферометрической когерентности и были бы видны на оптических изображениях.

Выявленная продолжающейся оползневой активности в пределах оползневого цирка и обрушения береговой линии требует организации непрерывного мониторинга этой и других опасных оползневых зон на реке Буря.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны Европейскому космическому агентству за данные Sentinel-1 и Sentinel-2.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования были выполнены в рамках госзаданий организаций — участников работ, а также при частичной поддержке РФФИ в рамках гранта 18–07–00816. Исследования выполнены также при поддержке Минобрнауки России (уникальный идентификатор проекта RFMEFI60719X0306).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А.* Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // *Физика Земли*. 2017. № 1. С. 34–53. doi: 10.7868/S0002333717010021
- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // *Исследование Земли из космоса*. 2010. № 6. С. 3–17.
- Бондур В.Г.* Космический мониторинг эмиссий малых газовых компонент и аэрозолей при природных пожарах в России // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 6. С. 21–35. doi: 10.7868/S0205961415060032
- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В., Стеблов Г.М., Шалимов С.Л.* Геомеханические модели и ионосферные вариации для крупнейших землетрясений при слабом воздействии градиентов атмосферного давления // *Доклады академии наук*. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- Бондур В.Г., Гинзбург А.С.* Эмиссия углеродсодержащих газов и аэрозолей от природных пожаров на территории России по данным космического мониторинга // *Доклады академии наук*. 2016. Т. 466. № 4. С. 473–477. doi: 10.7868/S0869565216040186
- Бондур В.Г., Гордо К.А., Кладов В.Л.* Пространственно-временные распределения площадей природных пожаров и эмиссий углеродсодержащих газов и аэрозолей на территории северной Евразии по данным космического мониторинга // *Исследование Земли из космоса*. 2016. № 6. С. 3–20. doi: 10.7868/S0205961416060105
- Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н.* Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Буря по данным интерферометрической съемки радаров L-диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2019а. Т. 16. № 5. С. 113–119.

- 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 радарными L-диапазона на примере реки Бурей // Исследование Земли из космоса. № 5. 2019b. с. 3–14
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Космический метод прогноза землетрясений на основе анализа динамики систем линеаментов // Исследование Земли из космоса. 2005a. № 3. С. 37–52.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Метод прогнозирования землетрясений на основе линеamentного анализа космических изображений // Доклады Академии наук. 2005b. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- Бондур В.Г., Зверев А.Т.* Механизмы формирования линеаментов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // Исследование Земли из космоса. 2007. № 1. С. 47–56.
- Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Савиных В.П.* Мониторинг и прогнозирование природных катастроф. М: Научный мир, 2009. 692 с.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А.* О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // Доклады Академии наук. 2008a. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- Бондур В.Г., Пулинец С.А., Узунов Д.* Воздействие крупномасштабных атмосферных вихревых процессов на ионосферу на примере урагана Катрина // Исследование Земли из космоса. 2008b. № 6. С. 3–11.
- Бондур В.Г., Смирнов В.М.* Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- Бондур В.Г., Старченков С.А.* Методы и программы обработки и классификации аэрокосмических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2001. № 3. С. 118–143.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Анализ текстуры радиолокационных изображений растительности // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008a. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008b. № 6. С. 64–73.
- 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. 2019c. № 3. С. 92–103. doi: 10.31857/S0205–96142019392–103
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Методы радарной поляриметрии для исследования изменений механизмов обратного рассеяния в зонах оползней на примере обрушения склона берега реки Бурей // Исследование Земли из космоса. № 4. 2019d. с. 3–17 doi: 10.31857/S0205–9614201943–17
- Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Возможности фазовых измерений в радиолокационной интерферометрии при наблюдении чрезвычайных ситуаций на примере Бурейского оползня // РЭНСИТ. т. 11 (1). 2019. С. 31–38. doi: 10.17725/tensit.2019.11.031
- Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурей по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 273–277.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И., Митник Л.М.* Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Бурей по данным Sentinel-1 // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74.
- 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 Бурей 11 декабря 2018 года // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
- Крамарева Л.С., Лупян Е.А., Амельченко Ю.А., Бурцев 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 // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019a. Т. 16. № 1. С. 259–265.
- Остроухов А.В., Ким В.И., Махинов А.Н.* Оценка морфометрических параметров оползня на Бурейском водохранилище и его последствий на основе ДДЗ3 и данных полевых измерений // Современ. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 254–258.
- Перерва Н.И., Давиденко А.Н., Амельченко Ю.А.* Анализ причин формирования дождевых паводков в бассейне р. Бурей в мае – июне 2019 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 303–306
- Природные опасности России. Монография в 6-ти томах. М.: КРЮК. 2000. 296 с.
- Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. Vol.14. P. R1–R54.
- Colesanti C, Wasowski J.* Investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry // *Engineering Geology*. 2006. V. 88. P. 173–199.
- http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf
- <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>
- www.rp5.ru

Monitoring of the Landslide Area State on Bureya River in 2018–2019 According to Radar and Optical Satellite Images

V. G. Bondur¹, L. N. Zakharova^{1,2}, A. I. Zakharov^{1,2}

¹ AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russia

² V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino Branch, Fryazino, Russia

The monitoring results of the current state of landslide area on the Bureya River in 2018–2019 are given using images from synthetic aperture radars and optical sensors of Sentinel multi-satellite system. Differential radar interferometry technique allowed to reveal the stability of the landslide surface in the first four months after the landslide and since the end of July 2019. Small-scale dynamics of the surface within the landslide circus was detected. It is shown that the interferometric technique is inapplicable for the observation of the large-scale modifications of the shoreline unlike the optical images where the effects of the collapse of the shoreline fragments and shoreline flooding were clearly observed compared also with radar amplitude images. The ongoing landslide activity within the landslide circus and the coastline collapse area was detected using satellite images. It requires the establishment of continuous monitoring of this and other dangerous landslide zones on Bureya River.

Keywords: Bureya River, remote sensing, multi-satellite system, optical images, synthetic aperture radar, radar images, radar interferometry, landslide, surface displacements

REFERENCES

- Akopian S. Ts., Bondur V.G., Rogozhin E.A. Technology for monitoring and forecasting strong earthquakes in Russia with the use of the seismic entropy method // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*. 2017. V. 53. № 1. P.32–51. doi: 10.1134/S1069351317010025
- Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // *Inverse Problems*. 1998. V.14. P. R1–R54.
- Bondur V.G. Aerospace Methods and Technologies for Monitoring Oil and Gas Areas and Facilities // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2011. V. 47. № 9. P. 1007–1018. doi: 10.1134/S0001433811090039
- Bondur V.G. Satellite monitoring of trace gas and aerosol emissions during wildfires in Russia // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2016. V. 52. № 9. P. 1078–1091. doi: 10.1134/S0001433816090103
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. Iss. 5. P. 9–14. (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N. Distantionnoe zondirovanie rastitel'nosti optiko-mikrovolnovymi metodami [Remote sensing of vegetation by optical microwave methods] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008b. Iss. 6. P. 64–73. (In Russian).
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N. Otsenka prostranstvennoy anizotropii neodnorodnostey lesnoy rastitelnosti pri razlichnykh azimutalnykh uglakh radarnogo polarimetricheskogo zondirovaniya [Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at various azimuth angles of the radar polarimetric sensing] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019c. № 3. P. 92–103. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019392-103> (In Russian)
- Bondur V.G., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N., Zakharov A.I., Zakharova L.N. Metody radarnoj polarimetrii dlya issledovaniya izmenenij mekhanizmov obratnogo rasseyaniya v zonah opolznej na primere obrusheniya sklona berega reki Bureya [Using radar polarimetry to monitor changes in backscattering mechanisms in landslide zones for the case study of the Bureya river bank collapse] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019d. № 4. P. 3–17. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201943-17> (In Russian)
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V., Steblou G.M., Shalimov S.L. Geomechanical models and ionospheric variations related to strongest earthquakes and weak influence of atmospheric pressure gradients // *Doklady Earth Sciences*. 2007. V. 414. № 4. P. 666–669. doi: 10.1134/S1028334X07040381
- Bondur V.G., Ginzburg A.S. Emission of Carbon-Bearing Gases and Aerosols from Natural Fires on the Territory of Russia Based on Space Monitoring // *Doklady Earth Sciences*. 2016. V. 466. № 2. P. 148–152. doi: 10.1134/S1028334X16020045
- Bondur V.G., Gordo K.A., Klavov V.L. Spacetime distributions of wildfire areas and emissions of carbon-containing gases and aerosols in northern Eurasia according to satellite-monitoring data // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2017. V. 53. № 9. P. 859–874. doi: 10.1134/S0001433817090055
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P. Monitoring i prognozirovanie prirodnykh katastrof [Monitoring and forecasting of the natural disasters]. M: Nauchny mir, 2009. 692 p. (In Russian)
- Bondur V.G., Pulinets S.A., Kim G.A. Role of variations in galactic cosmic rays in tropical cyclogenesis: evidence of Hurricane Katrina // *Doklady Earth Sciences*. 2008a. V. 422. № 7. P. 1124–1128. doi: 10.1134/S1028334X08070283

- Bondur V.G., Pulinets S.A., Uzunov D.* Vozdeystvie krupnomasshtabnykh atmosferykh vikhrevykh protsessov na ionosferu na primere uragana Katrina [Ionospheric effect of large-scale atmospheric vortex by the example of hurricane Katrina] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2008b. № 6. P. 3–11. (In Russian)
- Bondur V.G., Smirnov V.M.* Method for monitoring seismically hazardous territories by ionospheric variations recorded by satellite navigation systems // *Doklady Earth Sciences*. 2005. V. 403. № 5. P. 736–740.
- Bondur V.G., Starchenkov S.A.* Metody i programmy obrabotki i klassifikatsii aerokosmicheskikh izobrazheniy [Methods and programs of aerospace imagery processing and classification] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geodeziya i aerofotosemka*. 2001. № 3. P. 118–143. (In Russian)
- Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I. et al.* Dolgoremennyy monitoring opolznevoogo processa na beregu reki Bureya po dannym interferometricheskoy sjomki radarov L-diapazona [Long-term monitoring of landslide process on the Bureya riverbank according to interferometric L-band radar data] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019a. Vol. 16. No. 5. P. 113–119.
- Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N.* Monitoring of landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: Bureya river bank caving case // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019b. № 5. P. 3–14. (In Russian).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*. 2005a. V. 402. № 4. P. 561–567.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Kosmicheskii metod prognoza zemletryaseniya na osnove analiza dinamiki sistem lineamentov [A method of earthquake forecast based on the lineament dynamic analysis using satellite imagery] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2005 (b). № 3. P. 37–52. (In Russian)
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmoopasnykh territoriy [Lineament system formation mechanisms registered in space images during the monitoring of seismic danger areas] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2007. № 1. P. 47–56 (In Russian).
- Colesanti C, Wasowski J.* Investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry // *Engineering Geology*. 2006. V. 88. P. 173–199.
http://esamultimedia.esa.int/docs/S2-Data_Sheet.pdf
<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview>
- Kramareva L.S., Lupyan E.A., Amel'chenko Yu.A., Burtsev M.A., Krashennnikova Yu.S., Sukhanova V.V., Shami-lova 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. V. 15. № 7. P. 266–271. (In Russian)
- Kramareva L.S., Lupyan E.A., Amel'chenko Yu.A., Burtsev M.A., Krashennnikova Yu.S., Sukhanova V.V., Shami-lova Yu.A., Boroditskaya A.V.* Nablyudenie za khodom vzyryvnykh 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. V. 16. № 1. P. 259–265. (In Russian)
- Ostroukhov A.V., Kim V.I., Makhinov A.N.* Otsenka morfometricheskikh parametrov opolznia na Bureiskom vodokhranilishche i ego posledstviya 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. V. 16. № 1. P. 254–258. (In Russian)
- Pererva N.I., Davidenko A.N., Amel'chenko Yu.A.* Analysis of the causes of the rain floods formation in the Bureya River basin in May – June 2019 // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16. № 4. P. 303–306
- Prirodnye opasnosti Rossii [Natural hazards of Russia]. Monograph in 6 volumes. Volume 2. Seismic hazards (Edited by G.A. Sobolev), M.: Izd. KRUK. 2000. 296 p. (In Russian).
www.rp5.ru
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* Nablyudeniya dinamiki snezhnogo pokrova na radarnykh interferogrammakh L-diapazona [Observation of snow cover dynamics on L-band SAR interferograms] // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2017. V. 14. № 7. P. 190–197. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I., Mitnik L.M.* Pervye rezul'taty radiolokatsionnogo monitoringa posledstviya opolznia 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. V. 16. № 2. P. 69–74. (In Russian)
- Zakharova L.N., Zakharov A.I.* Nablyudeniya dinamiki zony opolznia na reke Bureya po dannym interferometricheskoy s'yomki Sentinel-1 v 2017–2018 [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. V. 16. № 2. P. 273–277. (In Russian)