

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ
ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

МОНИТОРИНГ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ С ПОМОЩЬЮ
КОСМИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ РАДАРОВ L-ДИАПАЗОНА
НА ПРИМЕРЕ ОБРУШЕНИЯ СКЛОНА БЕРЕГА РЕКИ БУРЕЯ

© 2019 г. В. Г. Бондур^{1,*}, Л. Н. Захарова^{2,**}, А. И. Захаров^{2,**}, Т. Н. Чимитдоржиев^{3,***},
А. В. Дмитриев³, П. Н. Дагуров³

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

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

³ Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ, Россия

*E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

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

*** E-mail: tchimit@gmail.com

Поступила в редакцию 04.09.2019 г.

Анализируются возможности интерферометрической съемки с помощью космических радаров L-диапазона PALSAR-1 и PALSAR-2 спутников ALOS-1 и ALOS-2 для исследования оползневых процессов на примере катастрофического схода грунта объемом ~18.5 млн. м³ на реке Бурей в декабре 2018 года. Выявлены подвижки поверхности оползня и оценена их интегральная амплитуда на временных интервалах до 2 лет. Установлено, что летние снимки менее информативны из-за резкой потери когерентности вследствие обильных дождевых осадков, а практически все зимние пары снимков, сделанные при низких отрицательных температурах, обладают высокой когерентностью вследствие стабильности диэлектрических свойств древесной растительности и подстилающих почв. На основании анализа динамики развития оползневого процесса на десятилетнем интервале времени показано, что смещения почв по склону были невелики в 2006–2010 гг. (1.6–1.9 см/мес.), в 2015–2016 гг. они значительно возросли (4.7–4.9 см/мес.), а максимальная измеренная скорость смещений была достигнута летом 2016 года (10.7 см/мес.). Сделано предположение о том, что активизация оползневого процесса пришлась на время завершения наполнения чаши водохранилища в 2006–2009 гг. и была спровоцирована как первоначальным подъемом, так и сезонными колебаниями уровня воды.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, радар, радиолокационные изображения, радиоинтерферометрия, смещения поверхности, оползень, река Бурей

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14>

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время наблюдается рост количества природных катастроф и вызываемых ими негативных последствий (Бондур и др., 2009; 2012; Природные опасности, 2000). В связи с этим актуальным становится разработка новых методов и технологий мониторинга и прогнозирования опасных природных процессов, в том числе таких, как: землетрясения (Акопян и др., 2017; Бондур, Зверев, 2005; 2007; Бондур и др., 2007; 2010; 2016а; 2016б; Бондур, Смирнов, 2005), тайфуны (Бондур и др., 2008а, б; 2009; 2012), оползни (Захарова и др., 2019; Крамарева и др., 2018; 2019; Бондур и др., 2019а, б), сели, лавины и др. (Природные опасности, 2000; Бондур и др., 2009; 2012). Важную роль для решения этих задач играют методы и средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и, прежде всего, всепогодные радиолокационные

методы (Верба и др., 2010; Бондур и др., 2009; 2019а, б, в; Бондур, 2010; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б; Захарова и др., 2019; Захаров, Захарова, 2017; Захарова, Захаров, 2019), а также методы обработки аэрокосмических изображений (Бондур, Старченков, 2001).

Методы радарной интерферометрии как инструмент выявления мелкомасштабных смещений подстилающей поверхности (Bamler, Hartl, 1998) давно применяются в практике дистанционного зондирования Земли. Среди примеров применения методов радиоинтерферометрии можно отметить, например, мониторинг оползневой активности (Kimura et al., 2000; Colesanti et al., 2006; Бондур и др., 2019а, б; Захарова, 2019; Захарова и др., 2019; Захарова, Захаров, 2019), криогенных деформаций грунта (Чимитдоржиев и др., 2011), просадок почв вследствие хозяйственной деятельности (Strozzi et al., 2003; Эпов и др., 2012).

В настоящей работе рассматриваются возможности применения радиоинтерферометрических методов для мониторинга оползневых процессов на примере обрушения склона берега реки Бурея, которое произошло 11 декабря 2018 г. При этом использовался классический метод дифференциальной радарной интерферометрии.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ДАННЫЕ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ОБРАБОТКИ

Катастрофический сход грунта на оползневом склоне берега реки Бурея, который произошел 11 декабря 2018 г., привлек большое внимание специалистов и исследователей (Крамарева и др., 2018, 2019; Захарова и др., 2019; Бондур и др. 2019а, б). Длина поверхности скольжения оползня составила около 800 м, ширина около 400 м, объем вынесенного грунта 18.5–18.9 млн м³ (Остроухов, 2019). Основным нерешенным вопросом остается выяснение причин схода оползня и времени начала подвижек грунта.

Бурея — один из самых многоводных притоков Амура. В верховьях эта горная река имеет скорость течения 3–4 м/с. В средней части река пересекает отроги хребтов Буреинский и Турана и течет по узкой каньонообразной долине, а в нижней части выходит на Зейско-Буреинскую равнину. Питание реки смешанное, паводки носят муссонный характер. До создания Бурейского водохранилища, наводнения происходили здесь почти ежегодно, а катастрофические паводки случались один раз в 10 лет (Коренюк, 2009). Узкое каньонное русло реки в районе оползня — это средняя часть 230-километрового водохранилища. Вследствие подъема воды, в процессе заполнения водохранилища, ширина реки здесь выросла с 200 до 400 м, а русло ручья Средний Сандар, впадающего в Бурею напротив места схода 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. Поскольку участок реки в районе оползня является частью водохранилища, сезонные колебания уровня воды вблизи плотины высотой порядка 16–19 м наблюдаются и здесь. Они являются причиной обезлесения в узкой прибрежной полосе на береговых склонах и, вероятно, причиной развития оползневых процессов (Остроухов и др., 2019). Климат в этом регионе резко континентальный с температурами летом 28 °С, а зимой –25 °С. Самый дождливый

месяц года — июль с 10-ю дождливыми днями и месячным количеством осадков до 140 мм.

Эффективность применения интерферометрических наблюдений земной поверхности с повторяющихся орбит космических аппаратов зависит от типа подстилающей поверхности и метеоусловий в зонах съемки. Существенной особенностью окружающей местности в средней, каньонной части русла реки Бурея с оползневой участком является наличие развитого растительного слоя — лиственных лесов. По северным склонам они зеленомошные, а по южным — травяные. Так как оползневой склон был покрыт лесной растительностью, то это затрудняло поиск постоянных отражателей (Бондур и др., 2019; Бондур, Чимитдоржиев, 2008а, б). Вместе с тем при определенных погодных условиях совокупность леса с подстилающей поверхностью может быть использована для интерферометрического анализа, в качестве протяженной единой цели.

Следует отметить, что декорреляция отраженных сигналов за время между космическими съемками нередко приводит к сильному зашумлению разности фаз на интерферограмме, что делает измерения недостоверными. Метод постоянных отражателей позволяют решать проблему временной декорреляции благодаря выявлению естественных отражателей (Ferretti et al., 2000). Постоянные отражатели — точечные яркие радиолокационные цели, дают стабильное отражение как по амплитуде, так и по фазе. Их выявляют путем статистического анализа данных, сформированных с использованием длинной серии последовательных радиолокационных съемок выбранного участка поверхности. В результате обеспечивается возможность проведения фазовых измерений даже в случае полной декорреляции сигналов окружающих естественных покровов.

Перспективными вариантами метода постоянных отражателей являются метод StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) (Hooper et al., 2007), метод SqueeSAR (Ferretti et al., 2011), метод малых базовых линий (Bernardino et al., 2002) и другие. В дополнение к естественным отражателям для выявления динамики подстилающей поверхности часто применяют искусственные стабильные цели — например, уголковые отражатели (Strozzi et al., 2013; Fu et al., 2010; Xia et al., 2004).

Первые исследования Бурейского оползня радиоинтерферометрическим методом были проведены по данным европейского радара с синтезированной апертурой С-диапазона, установленного на спутнике Sentinel-1. Начало съемок данного района с этого спутника приходится на лето 2016 г. (Захарова, Захаров, 2019). Такие съемки показали,

что еще зимой 2016–2017 гг. наблюдались вертикальные смещения почв на береговом склоне величиной около 3.5 см за месяц в направлении вниз по склону. Наблюдение подвижек почвы на склоне, покрытом древесной растительностью, на радиолокационных изображениях, полученных со спутника Sentinel-1 в осенне-весенний период, а также летом оказалось невозможным из-за высокой временной декорреляции эхо-сигналов этого радара, имеющего длину волны 5.6 см.

Более подходящим инструментом, данные которого устойчивее к временной декорреляции, являются радары длинноволнового L-диапазона. Использованные в данной работе изображения, полученные с помощью японского радара PALSAR-1 (длина волны 24 см) спутника ALOS-1 доступны для анализа начиная с лета 2006 г., когда водохранилище еще только заполнялось водой, по март 2011 г. Радиолокационные изображения, полученные радаром PALSAR-2 (длина волны также 24 см), установленного на борту спутника ALOS-2, использовались с осени 2014 г. по время подготовки настоящей статьи.

Особенностью орбиты спутника ALOS-1 является 46-дневный минимальный интервал повторной съемки — таким образом, можно получать интерферометрические пары, промежуток между которыми кратен 46 суткам. Вследствие дрейфа орбитальных параметров и редких, но существенных коррекций орбиты интерферометрическая

база менялась в пределах 0–20 км за 2 года функционирования этого спутника.

Интервал повторной (интерферометрической) съемки со спутника ALOS-2 кратен 14 дням. Благодаря частым небольшим коррекциям орбиты спутника ALOS-2 интерферометрическая база находилась в трубке диаметром 500 м.

Обработка радарных данных выполнялась с помощью программного пакета ENVI SARscape по технологии дифференциальной радарной интерферометрии. Ее суть состоит в выделении на интерферограмме фазовой компоненты, обусловленной смещением отражающего объекта. Для вычитания мешающей топографической фазы была использована цифровая модель рельефа (ЦМР) с пространственным разрешением 5 м, сформированная по данным съемки космической радарной бистатической системой TerraSAR-X/TanDEM-X от апреля 2012 г.

На рис. 1а представлен фрагмент интерферометрической разности фаз эхо-сигналов радаров TerraSAR-X/TanDEM-X, характеризующий рельеф местности. Этот и часть других результатов продублированы на веб-странице (Оползень на р. Бурей, 2019). Неоднозначность радиотехнических измерений фазы, принимающей значения в пределах $(0; 2\pi)$, приводит к появлению интерферометрических полос на фазовом изображении с повторяющимся цветовым циклом (см. рис. 1а).

В геометрии использованной съемки со спутника TerraSAR-X изменение разности фаз сигналов на 2π (один цветовой цикл на рис. 1а) соответствует изменению высоты рельефа на 16.7 м. Контур зоны обрушения в декабре 2018 г. (замкнутая линия красного цвета) указан стрелкой на рис. 1а. Трехмерное представление цифровой модели рельефа до обрушения представлено на рис. 1б, где стрелка также указывает на контур зоны обрушения.

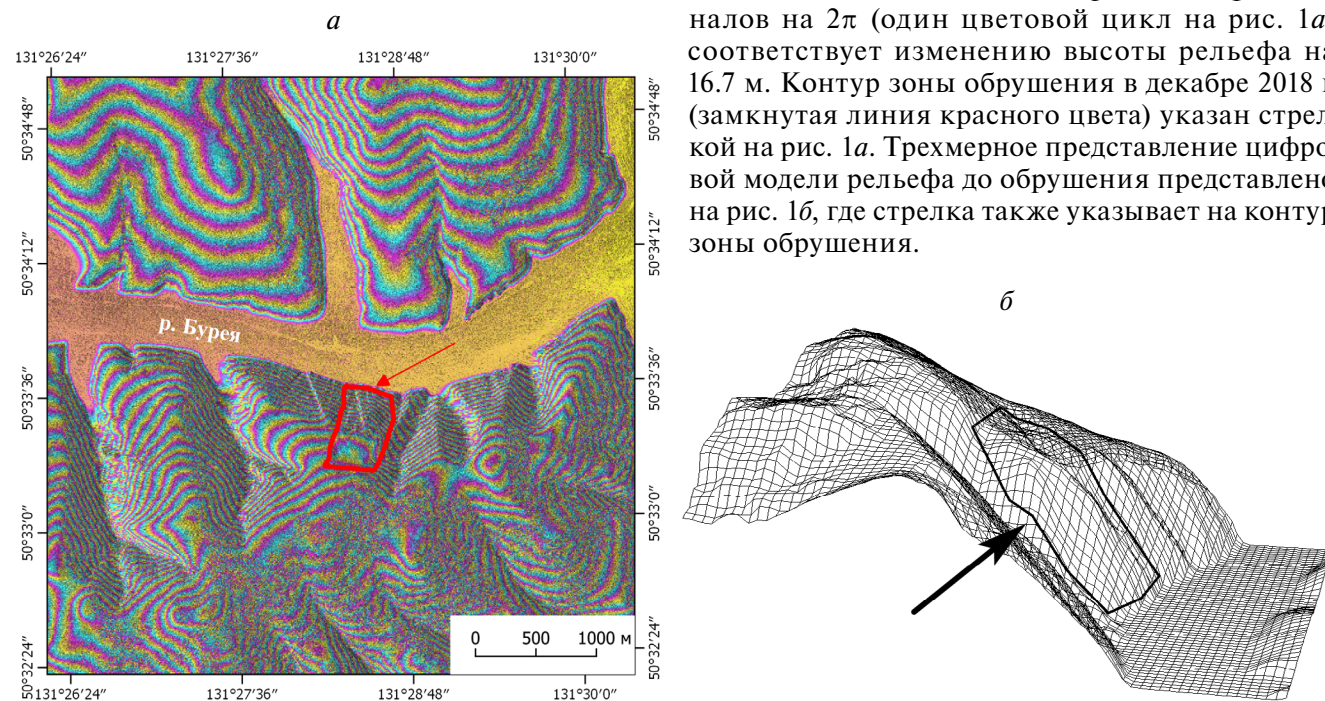


Рис. 1. Фрагмент интерферометрической разности фаз радиолокационных эхо-сигналов спутников TerraSAR-X/TanDEM-X (а) и трехмерная визуализация цифровой модели рельефа оползневого склона (б).

В архиве Японского космического агентства JAXA имеются 32 радиолокационных изображения района оползня, выполненные радаром PALSAR-1 спутника ALOS-1 с условных трасс 414, 415, 418, 419, а также 16 изображений, полученных радаром PALSAR-2 спутника ALOS-2 с условных трасс 127, 128, которые пригодны для интерферометрической обработки.

Важным показателем качества интерферометрических измерений является когерентность сигналов интерферометрической пары. Когерентность зависит в первую очередь от длины перпендикулярной проекции интерферометрической базы, интервала времени между получением пары изображений, метеоусловий в дни съемки и накануне. Следствием неодновременности съемок является временная декорреляция отраженных сигналов, которая является показателем нестабильности условий отражения.

Благодаря сравнительно большой длине волны сигналов радаров PALSAR-1 и PALSAR-2, временная стабильность отражений оказывается более высокой по сравнению с радаром С-диапазона. Вследствие этого из радиолокационных изображений, полученных в зимнее время года, например, можно составлять достаточно информативные интерферометрические пары с интервалом между съемками до 2 лет. При этом летние радиолокационные изображения менее пригодны для измерений из-за значительной временной декорреляции эхо-сигналов, вызванной

сильными дождями незадолго или во время съемки.

Источником сведений о температуре воздуха и осадках были данные метеостанции Сектагли, расположенной в 35 км к западу от оползневого участка (www.rp5.ru).

Архивные радиолокационные изображения подвергались тщательному отбору при составлении интерферометрических пар. В первую очередь они были разбиты на зимние и летние. К зимним относились радиолокационные изображения, полученные при отрицательной средней температуре воздуха в течение трех дней, включая день съемки. Зимние и летние радиолокационные изображения не объединялись в интерферометрические пары вследствие сильно меняющихся диэлектрических свойств отражающей поверхности при замерзании, что приводит к резкому снижению когерентности. Кроме того, из рассмотрения были исключены пары изображений, где база интерферометра превышала 4 км.

На рис. 2 представлены значения интерферометрической когерентности для 23 пар радиолокационных изображений, полученных с помощью радара PALSAR-1 спутника ALOS-1 для территории оползневой зоны. Из анализа рис. 2 следует, что наиболее высокая когерентность наблюдается у пар изображений, полученных в холодное время года (ромбовидные маркеры). При этом с ростом интервала между получением пары радиолокационных изображений когерентность ожидаемо

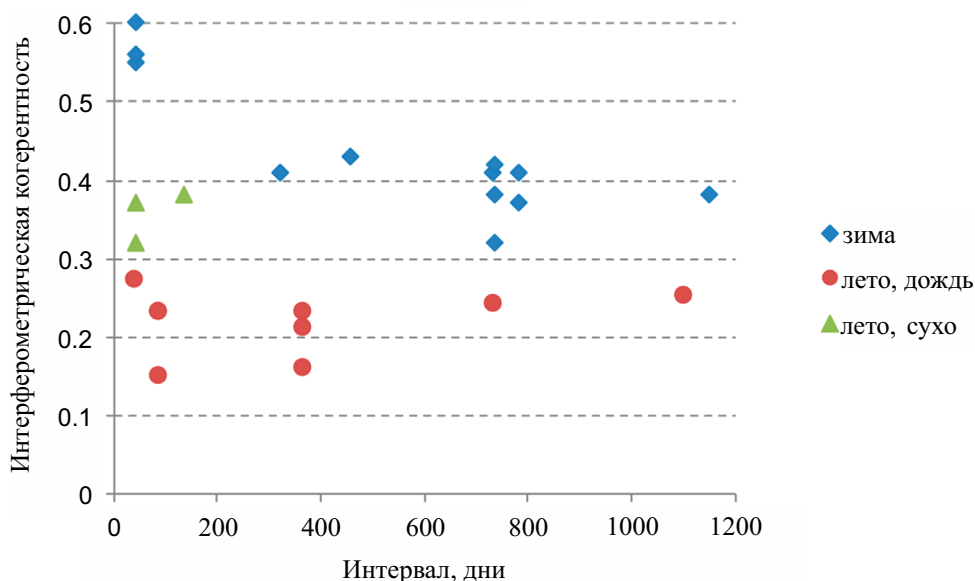


Рис. 2. Когерентность сигналов ALOS-1 PALSAR-1 (вертикальная ось) в зависимости от интервала между съемками интерферометрической пары (горизонтальная ось, дни).

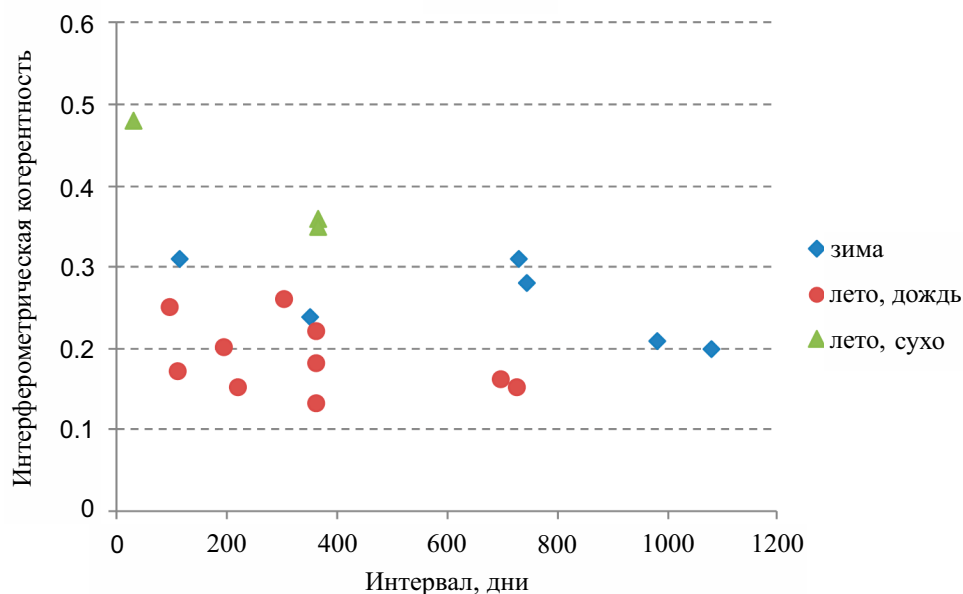


Рис. 3. Когерентность сигналов ALOS-2 PALSAR-2 (вертикальная ось) в зависимости от интервала между съемками интерферометрической пары (горизонтальная ось, дни).

падает. Достаточно высокая когерентность проявлялась для нескольких пар изображений, полученных в сухую погоду летом (треугольники). Дождливая погода в дни съемки или в дни, предшествующие съемке, с суммарным количеством осадков за 4 дня, предшествовавших съемке, более 20 мм, привела к сильному падению когерентности (круглые маркеры) и потере информативности фазовых измерений. Описываемые далее результаты измерений подвижек земной поверхности получены при анализе пар изображений с когерентностью выше 0.3.

Рис. 3 иллюстрирует аналогичные измерения для данных, полученных радаром PALSAR-2 со спутника ALOS-2. Из 19 пар радиолокационных изображений, полученных с этого спутника, только 3 пары летних изображений (треугольники на рис. 3) имеют достаточно высокую когерентность (более 0.3). Большинство летних пар радиолокационных изображений (кружки на рис. 3) имеют когерентность ниже 0.3 из-за дождливой погоды с суммарным количеством осадков за 4 дня, предшествовавших съемке, более 25 мм, и не являются информативными. Все пары зимних радиолокационных изображений, полученных со спутника ALOS-2 (ромбы на рис. 3), имеют низкую когерентность по причине отсутствия морозов в дни съемки (температура около нуля градусов), из-за чего, возможно, происходило неоднократное оттаивание-заморозание верхнего слоя рассеивающей поверхности.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ИХ АНАЛИЗ

После обработки отобранных 42 пар радиолокационных изображений и анализа результатов информативными, в соответствии с приведенными выше уровнями когерентности, признаны только 12 интерферограмм.

На рис. 4а показана летняя дифференциальная интерферограмма, полученная по данным со спутника ALOS-2, с интервалом между съемками 28 дней (15.06.2016–13.07.2016). На темном 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 вытянутого светлого пятна по сравнению с окружающим более темным фоном (заключена в белое кольцо). В принятой схеме обработки смещение отражающей поверхности в сторону от радара за время между съемками приводит к увеличению разности фаз, отображенному светлыми тонами на интерферограмме. Неоднородная яркость пятна свидетельствует о более высокой скорости движения в верхней части оползня, вблизи будущей стенки отрыва. На этой интерферограмме радиальная скорость смещения поверхности меняется в пределах оползневой зоны от 2 до 4 см за 28 дней, что в пересчете на смещение вдоль склона дает до 10.7 см/мес. Это заметно больше, чем спустя полгода зимой по данным Sentinel-1 — 0.6 см за 12 дней, т.е. 3.4 см/мес. по склону (Захарова, Захаров, 2019).

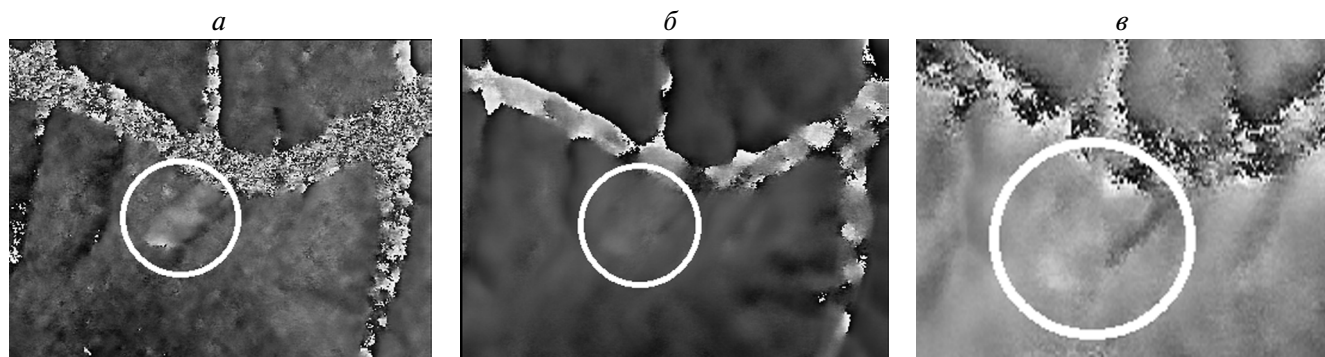


Рис. 4. Фрагменты интерферограмм: *a* — ALOS-2 PALSAR-2 от 15.06.2016–13.07.2016, *б* — ALOS-1 PALSAR-1 от 13.01.2009–28.02.2009, *в* — ALOS-1 PALSAR-1 от 16.05.2006–01.10.2006.

Анализ радиолокационных изображений, полученных со спутника ALOS-1 от 2006–2010 гг., показывает, что на зимних интерферограммах фазовый набег из-за подвижек не столь велик даже при большем, чем летом 2016 г., интервале между съемками. Это может быть объяснено как более ранней и медленной стадией развития оползневой процесса, так и большей стабильностью замерзшего грунта в холодное время года. Так, на рис. 4*б* показана интерферограмма 13.01.2009–28.02.2009, где максимальная разность фаз на теле оползня с усредненным окружающим фоном составляет 0,6 радиан, что соответствует радиальному смещению менее чем 1,2 см за 46 дней (1,8 см/мес. вдоль склона). На летней (май–октябрь) интерферограмме 16.05.2006–01.10.2006 по данным PALSAR-1

(рис. 4*в*) 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. 5*а* приведена интерферограмма для пары радиолокационных изображений 08.01.2007–28.02.2009. Здесь смещения земной поверхности в верхней части оползня таковы, что происходит заворот значений фазы, и на интерферограмме в районе оползня, в отличие от рис. 4, появляется линия перехода через 2π — резкая граница черного 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.

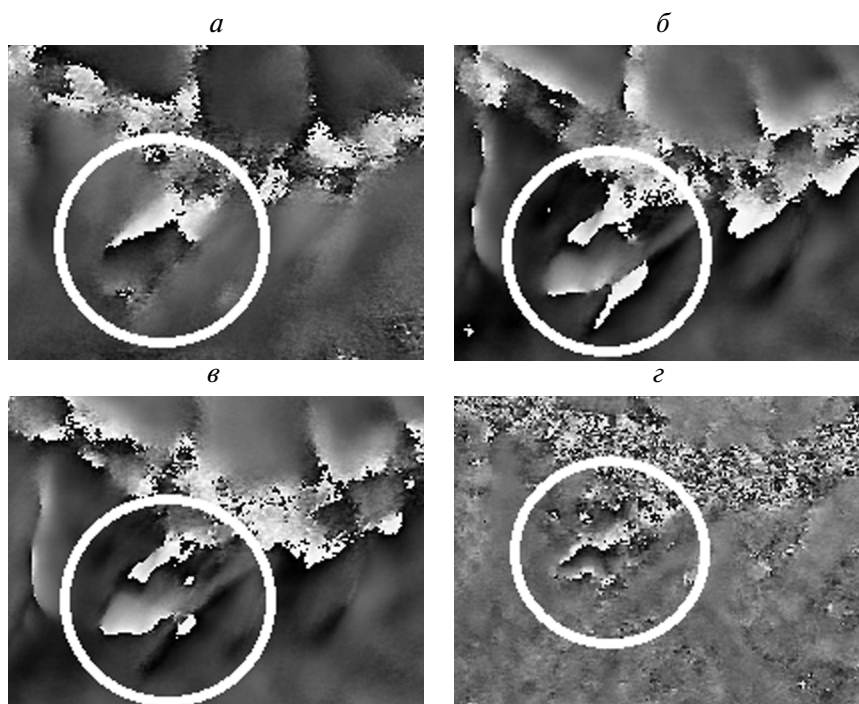


Рис. 5. Фрагменты интерферограмм: *a* — от 08.01.2007–28.02.2009, *б* — от 11.01.2008–16.01.2010, *в* — от 26.02.2008–03.03.2010, *г* — с годичным интервалом от 22.06.2015–20.06.2016.

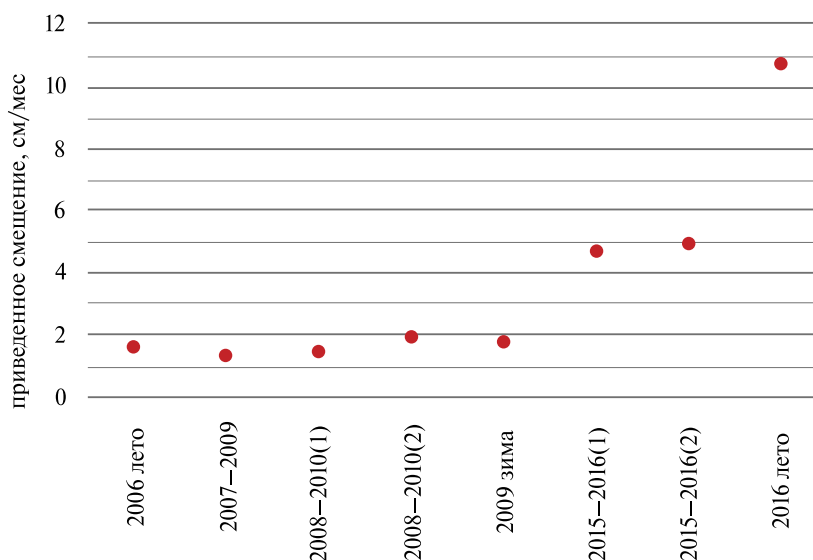


Рис. 6. Величины смещений, измеренные на интерферограммах радаров PALSAR-1 (2006–2010) и PALSAR-2 (2015–2016), приведенные к см/мес. в направлении вниз по склону.

Близкие к приведенным скорости смещения поверхности получены для двухлетних пар 11.01.2008–16.01.2010 и 26.02.2008–03.03.2010, интерферограммы для которых показаны на рис. 5б и 5в (1.5 и 1.9 см/мес. вниз по склону). Особенностью этих двух интерферограмм является наличие значительного снежного покрова различной толщины в разные дни съемки. По данным метеостанции Сектагли, прирост толщины снежного покрова от уровня в первой съемке первой пары ко второй съемке составил 8 см, а для второй пары — 17 см. Известно, что наличие слоя свежего снега толщиной около 6 см, выпавшего за время между съемками, приводит к увеличению длины пути сигнала на 1 см (Захаров, Захарова, 2017). В данном случае однородный слой снега на поверхности речного склона порядка 30–40 см, равно как и его приращение за время между съемками, практически не повлияли на фазовую картину на интерферограммах, добавив в разность фаз неизвестную, но почти постоянную по полю изображению компоненту.

Согласно результатам обработки интерферометрической пары 22.06.2015–20.06.2016 радара PALSAR-2 (рис. 5г), максимальная радиальная скорость смещения земной поверхности 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, дает близкое значение скорости смещения — 4.9 см/мес.

На рис. 6 показаны значения максимальных смещений для всех упомянутых пар радиолокационных данных, измеренных по величине отличия

фазы на оползневом участке от фазы окружающих неподвижных участков на соответствующих интерферограммах, в пересчете на смещение вдоль оползневого склона за 30 дней. Различия между скоростями смещений в парах, полученных радиолокатором PALSAR-1 в 2006–2010 гг. для промежутков от 46 до 782 дней, незначительны и почти постоянны. Скорости же, полученные по данным PALSAR-2 в 2015–2016 гг., заметно выше. Максимальная скорость наблюдалась летом 2016 г., она превышала 10 см/мес. и приближалась к значениям, полученным по данным Sentinel-1 в начале зимы 2017–2018 гг. — 7 см за 12 дней, или 17 см/мес. в направлении вниз по склону (Захарова, Захаров, 2019).

Полученные результаты свидетельствуют о том, что скорость движения оползня летом, как правило, выше, чем зимой. Наименьшая измеренная скорость движения отмечена для начала периода наблюдения в 2006 г.

Вероятной причиной оползневого процесса является заполнение водохранилища, рабочий уровень воды в котором был достигнут в 2009 году, и последующие сезонные колебания уровня воды. Максимальное радиальное смещение — 23 см за год — выявлено в конце цикла наблюдений радаром PALSAR-2, ближе к моменту схода оползня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Длительный мониторинг оползня на реке Бурея на десятилетнем интервале времени стал возможным благодаря использованию архивных радиолокационных изображений, полученных

радарными сравнительно длинноволнового L-диапазона в 2006–2016 гг. Отражающая поверхность в этом диапазоне длин электромагнитных волн демонстрирует высокую стабильность рассеяния, что дает возможность получать интегральные оценки подвижек поверхности на интервале до 2 лет.

Вместе с тем, летние радиолокационные изображения зачастую были менее информативными из-за резкой потери когерентности вследствие обильных дождевых осадков в день съемки или непосредственно перед ним. Практически все зимние пары радиолокационных изображений, полученные при низких отрицательных температурах, обладали высокой когерентностью, благодаря высокой стабильности диэлектрических свойств древесной растительности и подстилающих почв.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности радиоинтерферометрических методов дистанционного зондирования для исследования и мониторинга таких опасных природных процессов, как оползни.

Авторы благодарны японскому аэрокосмическому агентству JAXA за радарные данные ALOS PALSAR и ALOS-2 PALSAR-2, предоставленные в рамках научных проектов RA-6, и германскому аэрокосмическому центру DLR за данные TerraSAR-X/TanDEM-X.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследования были выполнены в рамках госзаданий НИИ «АЭРОКОСМОС» № 075–00896–19–01 (тема № ON58–2019–0030), госзаданий ИРЭ им. В.А. Котельникова, Института физического материаловедения СО РАН, а также при частичной поддержке РФФИ в рамках гранта 18–07–00816.

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., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б. Крупномасштабное взаимодействие сейсмоактивных тектонических провинций. На примере Южной Калифорнии //

Доклады академии наук. 2016а. Т. 466. № 5. С. 598–601. doi: 10.7868/S0869565216050170

Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // *Доклады академии наук*. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.

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., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Калифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // *Физика Земли*. 2016б. № 1. С. 120–132. doi: 10.7868/S000233371601004X

Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И. и др. Долговременный мониторинг оползневой процесса на берегу реки Бурья по данным интерферометрической съемки радаров L-диапазона // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019а.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линейного анализа космических изображений // *Доклады Академии наук*. 2005. Том 402. № 1. С. 98–105.

Бондур В.Г., Зверев А.Т. Механизмы формирования линейных элементов, регистрируемых на космических изображениях при мониторинге сейсмоопасных территорий // *Исследование Земли из космоса*. 2007. № 1. С. 47–56.

Бондур В.Г., Крапивин В.Ф., Потапов И.И., Солдатов В.Ю. Природные катастрофы и окружающая среда // *Проблемы окружающей среды и природных ресурсов*. 2012. № 1. С. 3–160.

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*. 2008а. 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*. 2008б. № 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. 2008а. № 5. С. 9–14.
- Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н.* Дистанционное зондирование растительности оптико-микроволновыми методами // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008б. № 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. 2019б. № 3. С. 92–103. doi: <https://doi.org/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. 2019в. № 4. С. 3–17. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201943-17>
- Захаров А.И., Захарова Л.Н.* Наблюдения динамики снежного покрова на радарных интерферограммах L-диапазона // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 7. С. 190–197.
- Захарова Л.Н., Захаров А.И.* Наблюдение динамики зоны оползня на реке Бурей по данным интерферометрической съемки Sentinel-1 в 2017–2018 гг. // Соврем. 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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74.
- Коренюк И.Ю.* Живая Бурей. Хабаровск: РусГидро, 2009. 84 с.
- 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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019а. Т. 16. № 1. С. 259–265.
- 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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 266–271.
- Оползень на р. Бурей. [Электронный ресурс]. URL: <http://omdoki.nextgis.com/resource/103/display> (дата обращения 01.07.2019).
- 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 // Соврем. пробл. дист. зондир. Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 254–258.
- Природные опасности России. Монография в 6-ти томах. М.: КРУК. 2000. 296 с.
- Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Татьков Г.И., Хаптанов В.Б., Дмитриев А.В., Будаев Р.Ц., Цыбенков Ю.Б.* Исследование криогенных деформаций грунта в дельте реки Селенга с помощью спутниковой РСА-интерферометрии и наземного георадарного зондирования // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 5. С. 58–63.
- Эпов М.И., Миронов В.Л., Чимитдоржиев Т.Н., Захаров А.И., Захарова Л.Н., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В.* Наблюдение просадок поверхности земли в районе подземных угольных выработок Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии ALOS PALSAR // Исслед. Земли из космоса. 2012. № 4. С. 26–29.
- Bamler R., Hartl P.* Synthetic aperture radar interferometry // Inverse Problems. 1998. V.14. P. R1-R54.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2002. V. 40 (11). P. 2375–2383.
- Colesanti C., Wasowski J.* Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry // Engineering Geology. 2006. V. 88. P. 173–199.
- Ferretti A., Fumagalli A., Novati F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Hooper A., Segall P., Zebker H.* Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2007. V. 112. № B7. P. B07407–1–B07407–21.
- Kimura H., Yamaguchi Y.* Detection of landslide areas using satellite radar interferometry // Photogramm. Eng. Remote Sensing. 2000. V. 66. P. 337–344.
- Strozzi T., Teatini P., Tosi L., Wegmüller U., Werner C.* Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors // J. Geophys. Res.: Earth Surface. 2013. V. 118. P. 1177–1191. doi:10.1002/jgrf.20082
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Werner, C., Wiesmann, A., Spreckels, V.* JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2003. № 41. P. 1702–1708.
- Xia Y., Kaufmann H., Guo X.F.* Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-INSAR and corner reflectors // Photogramm. Eng. Remote Sens. 2004. № 70 (10). P. 1167–1172.

Monitoring of Landslide Processes by Means of L-Band Radar Interferometric Observations: Bureya River Bank Caving Case

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, Russia*

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

³ *Institute of Physical Materials Science SB RAS, Ulan-Ude, Russia*

The potential of PALSAR-1 (ALOS-1 sat.) and PALSAR-2 (ALOS-2 sat.) L-band radars interferometric observations of the landslide processes is analyzed in this paper with reference to Bureya riverbank landfall occurred in December 2018 when more than 18.5 million m³ of soils crashed into the riverbed. The displacements of the landslide surface were detected and total amplitudes of displacements even on the 2-years' time intervals were estimated. Summer images were less informative because of abrupt loss of coherence in the case of heavy precipitations happened during the radar observation. Winter observations made at negative air temperatures are mainly coherent because of temporal stability of dielectric properties of trees and underlying soils. The history of landslide dynamics on decadelong interval is reconstructed. According to our estimations, the velocities of summer displacements are typically higher than wintertime ones. The displacements were low in 2006–2010 (1.6–1.9 cm/month), then they increased significantly in 2015–2016 (4.7–4.9 cm/month), the maximal measured velocity in summer 2016 reached 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 was provoked by both the initial rising and seasonal oscillations of the water level.

Keywords: Earth remote sensing, radar, radar imagery, radar interferometry, estimation of surface displacements, landslide, Bureya river

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.
- Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E.* A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2002. V. 40(11). P. 2375–2383.
- 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., Chimitdorzhiev T.N.* Analiz tekstury radiolokatsionnykh izobrazheniy rastitelnosti [Texture analysis of radar images of vegetation] // *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotosemka*. 2008a. № 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. № 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 polyarimetricheskogo zondirovaniya [Spatial anisotropy assessment of the forest vegetation heterogeneity at various azimuth angles of the radar polarimetric sensing] // *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2019. № 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 polyarimetrii 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*. 2019. № 4. P. 3–17. doi: <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201943-17>.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B.* Large scale interaction of seismically active tectonic provinces: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*, 2016a, V. 466. № 2. P. 183–186. doi: 10.1134/S1028334X16020100.
- Bondur V.G., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Lapshin V.M., Nechaev Yu.V.* Connection between variations of the stress–strain state of the Earth's crust and seismic activity: the example of Southern California // *Doklady Earth Sciences*. 2010. V. 430. Part 1. P. 147–150. doi: 10.1134/S1028334X10010320
- 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., Garagash I.A., Gokhberg M.B., Rodkin M.V.* The Evolution of the Stress State in Southern California Based on the Geomechanical Model and Current Seismicity // *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 2016b. V. 52. № 1. P. 117–128. doi 10.1134/S1069351316010043
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Potapov I.I., Soldatov V. Ju.* Prirodnye katastrofy i okruzhajushhaja sreda [Natural disasters and the environment] // *Problemy okruzhajushhej sredy i prirodnyh resursov*. 2012. № 1. P. 3–160. (In Russian).
- Bondur V.G., Krapivin V.F., Savinykh V.P.* Monitoring i prognozirovaniye 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 atmosferynykh 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. Vol. 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.* Dolgovremennyy monitoring opolzneвого processa na beregu reki Bureya po dannym interferometricheskoy s'jomki radarov L-diapazona [Long-term monitoring of landslide process on the Bureya riverbank according to interferometric L-band radar data] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019a (in press).
- Bondur V.G., Zverev A.T.* A method of earthquake forecast based on the lineament analysis of satellite images // *Doklady Earth Sciences*, 2005. V. 402. № 4. P. 561–567.
- Bondur V.G., Zverev A.T.* Mekhanizmy formirovaniya lineamentov, registriruemykh na kosmicheskikh izobrazheniyakh pri monitoringe seysmopasnykh 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).
- Chimitdorzhiev T.N., Zakharov A.I., Tat'kov G.I., Khaptanov V.B. Dmitriev A.V., Budaev R. Ts., Tsybenov Yu.B.* Issledovaniye kriogennykh deformatsiy grunta v del'te reki Selenga s pomoshchyu sputnikovoy RSA-interferometrii i nazemnogo georadarnogo zondirovaniya [Study of Soils Cryogenic Deformation in Selenga River Delta by Means of SAR Interferometry and Georadar Sounding] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2011. № 5. P. 58–63. (In Russian).
- Colesanti C, Wasowski J.* Investigating landslides with spaceborne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry // *Engineering Geology*. 2006. V. 88. P. 173–199.
- Epov M.I., Mironov V.L., Chymytdorzhiev T.N., Zakharov A.I., Zakharova L.N., Seleznev V.S., Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V.* Nablyudeniye prosadok poverhnosti zemli v rayone podzemnykh ugol'nykh vyrabotok Kuzbassa po dannym radiolokatsionnoy interferometrii ALOS PALSAR [Observation of Earth's Surface Subsidence in the Area of Kuzbas Underground Coal Mining with ALOS PALSAR Radar Interferometry] // *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2012. № 4. P. 26–29. (In Russian)
- Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.* A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2011. V. 49. № 9. P. 3460–3470.
- Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2000. V. 38. № 5. P. 2202–2212.
- Hooper A., Segall P., Zebker H.* Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcan Alcedo, Galapagos // *J. Geophys. Res.: Solid Earth*. 2007. V. 112. № B7. P. B07407–1–B07407–21.
- Kimura H, Yamaguchi Y.* Detection of landslide areas using satellite radar interferometry // *Photogramm. Eng. Remote Sensing*. 2000. V. 66. P. 337–344.
- Korenyuk I. Yu.* Zhivaya Bureya [Alive Bureya]. Khabarovsk, RusGidro, 2009. 84 p. (In Russian)
- Kramareva L.S., Lupyan E.A., Amel'chenko Yu.A., Burtsev M.A., Krashenninnikova Yu.S., Sukhanova V.V., Shamilova Yu.A., Boroditskaya A.V.* Nablyudeniye 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] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019. V. 16, № 1, P. 259–265. (In Russian)
- Kramareva L.S., Lupyan E.A., Amel'chenko Yu.A., Burtsev M.A., Krashenninnikova Yu.S., Sukhanova V.V., Shamilova Yu.A.* Nablyudeniye 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] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018. V. 15, № 7, P. 266–271. (In Russian)
- Opolzen na r. Bureya [Landslide on Bureya River]. URL: available at: <http://omdoki.nextgis.com/resource/103/display> (01.07.2019). (In Russian).
- Ostroukhov A.V., Kim V.I., Makhinov A.N.* Otsenka morfo-metricheskikh parametrov opolznaya na Bureiskom vodokhranilishche i ego posledstviy na osnove DDZZ i dannyykh polevykh izmereniy [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] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019. V. 16. № 1. P. 254–258. (In Russian)

- Prirodnye opasnosti Rossii [Natural hazards of Russia]. Monograph in 6 volumes. Volume 2. Seismic hazards (Edited by G.A. Sobolev), M.: KRUK. 2000. 296 pp. (In Russian).
- Strozzi T., Teatini P., Tosi L., Wegmüller U., Werner C.* Land subsidence of natural transitional environments by satellite radar interferometry on artificial reflectors // *J. Geophys. Res.: Earth Surface*. 2013. V. 118. P. 1177–1191, doi:10.1002/jgrf.20082
- Strozzi T., Wegmüller U., Werner C., Wiesmann A., Spreckels V.* JERS SAR interferometry for land subsidence monitoring // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2003. № 41. P. 1702–1708.
- Xia Y., Kaufmann H., Guo X.F.* Landslide monitoring in the Three Gorges area using D-INSAR and corner reflectors // *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 2004. № 70 (10). P. 1167–1172.
- Zakharov A.I., Zakharova L.N.* Nablyudeniya dinamiki snezhnogo pokrova na radarnyh interferogrammah 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 posledstviy opolznya 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 opolznya 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).