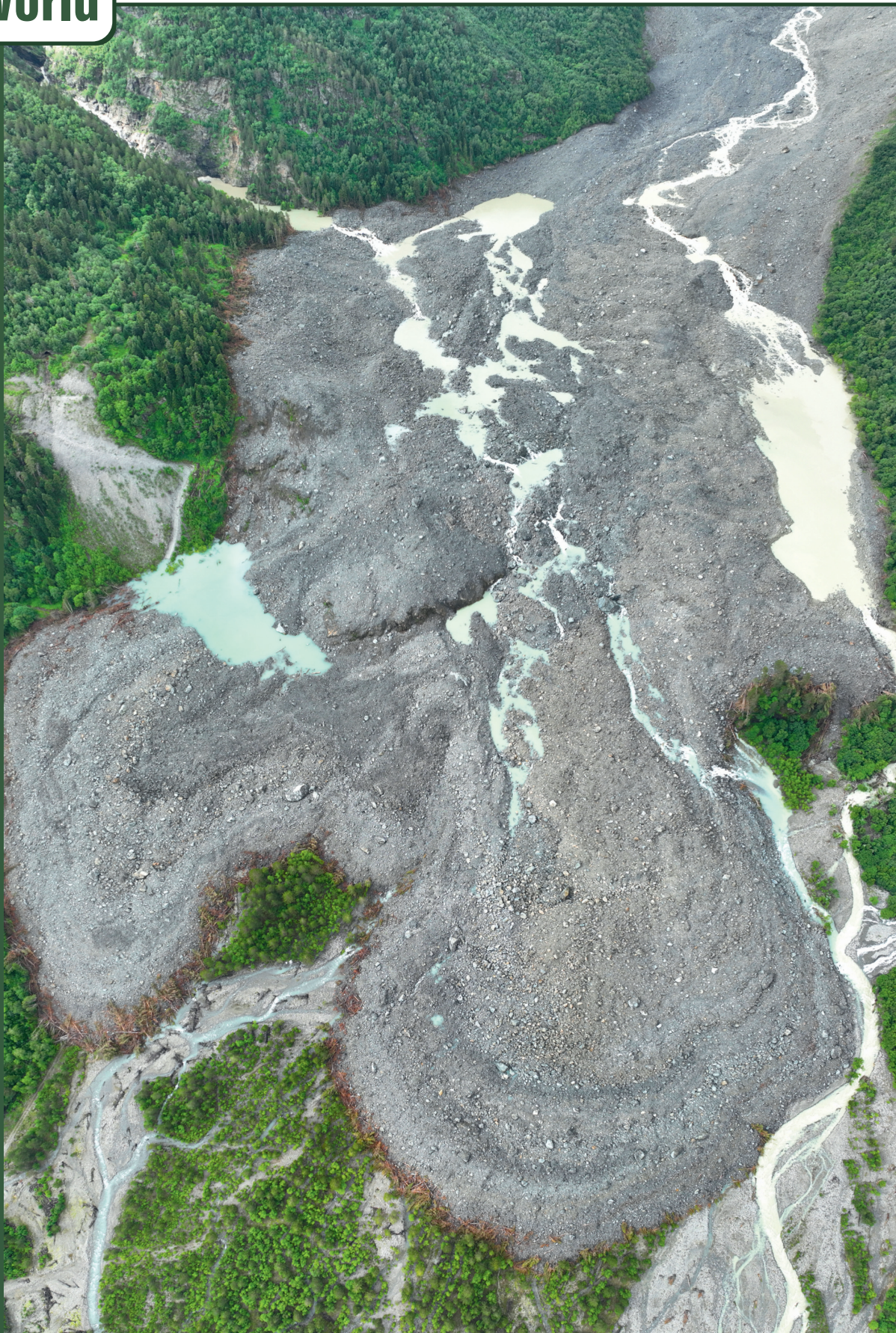


Том XVI | 3/2022
Vol. XVI

ISSN 1997-8669 (Print)
ISSN 2587-8220 (Online)

GeoRisk

GeoRisk World



ПРИ ПОДДЕРЖКЕ:



Саморегулируемая организация



Ассоциация
«Инженерные изыскания
в строительстве» —
Общероссийское отраслевое
объединение работодателей

О каменной лавине 01.01.2022 в долине р. Аксаут (Западный Кавказ) и концентрации подобных явлений на локальных участках горных хребтов

ДОКУКИН М.Д., БЕККИЕВ М.Ю., КАЛОВ Р.Х.

Высокогорный геофизический институт

САВЕРНЮК Е.А., ЧЕРНОМОРЕЦ С.С.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

ШАГИН С.И.

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова

8

Исследование многолетней динамики Бурейского оползня методом космической радиолокационной интерферометрии

ЗАХАРОВА Л.Н., ЗАХАРОВ А.И., СНИЛО В.П.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН

20

Оценка оползневой опасности Нурекского района Таджикистана с применением метода соотношения частот. Часть 1

МУМИНОВ Б.Х.

Тюменский государственный университет

ФОМЕНКО И.К.

Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

СМИРНОВ П.В.

Казанский (Приволжский) федеральный университет

36

Обзор геодинамических полигонов Таджикистана для упрощенного ретроспективного анализа

РАХМАНОВ А.С., РАХМОНОВ С.С.

Московский государственный университет геодезии и картографии

50

ПРИЛОЖЕНИЕ

Озеро Иссык 7 июля 1963 г.

ЕРМОЛИН Е.Д.

Аргентинский Антарктический институт

62

Международная летняя школа по изучению скальных оползней и сопутствующих явлений в бассейне р. Кокомерен (Кыргызстан) в 2023 г.

66

Обзор опасных природных явлений за июль — сентябрь 2022 г.

ШАНИНА В.В.

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

70

Перечень научных специальностей с указанием соответствующих им отраслей науки, которым соответствует основное содержание рецензируемого научного издания:

1.6.1. Общая и региональная геология. Геотектоника и геодинамика (геолого-минералогические науки);

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (геолого-минералогические науки);

1.6.7. Инженерная геология, мерзлотоведение и грунтоведение (технические науки);

1.6.8. Гляциология и криология Земли (географические науки);

1.6.9. Геофизика (геолого-минералогические науки);

1.6.9. Геофизика (физико-математические науки);

1.6.9. Геофизика (технические науки);

1.6.12. Физическая география и биогеография, география почв и геохимия ландшафтов (географические науки);

1.6.16. Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия (географические науки);

1.6.17. Океанология (геолого-минералогические науки);

1.6.17. Океанология (физико-математические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (географические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (геолого-минералогические науки);

1.6.20. Геоинформатика, картография (технические науки);

1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки);

1.6.21. Геоэкология (географические науки).

Фото на обложке / Photo on the cover:
Каменная лавина в долине р. Аксаут (Карачаево-Черкесская Республика). Фото С.С. Черноморца



About the rock avalanche on 1 January 2022 in the Aksaut River valley (Western Caucasus) and the concentration of similar phenomena in local areas of mountain ranges

DOKUKIN M.D., BEKKIEV M.Yu., KALOV R.KH.

High-Mountain Geophysical Institute

SAVERNYUK E.A., CHERNOMORETS S.S.

Lomonosov Moscow State University

SHAGIN S.I.

Berbekov Kabardino-Balkarian State University

8

Study of long-term dynamics of the Bureya landslide using spaceborne SAR interferometry

ZAKHAROVA L.N., ZAKHAROV A.I., SINILO V.P.

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences

20

Landslide hazard assessment of the Nurek District of Tajikistan using the frequency ratio method. Part 1

MUMINOV B.Kh.

Tyumen State University

FOMENKO I.K.

Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting

SMIRNOV P.V.

Kazan Federal University

36

Overview of geodynamic polygons of Tajikistan for simplified retrospective analysis

RAKHMANOV A.S., RAKHMONOV S.S.

Moscow State University of Geodesy and Cartography

50

SUPPLEMENT

Issyk, 7 July 1963

ERMOLIN E.D.

Argentine Antarctic Institute

62

ICL KOKOMEREN SUMMER SCHOOL – 2023

66

Review of natural hazardous events for July – September of 2022

SHANINA V.V.

Lomonosov Moscow State University

70

ИССЛЕДОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ БУРЕЙСКОГО ОПОЛЗНЯ МЕТОДОМ КОСМИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ



Источник: <https://amur.info/2023/06/19/ogromnyj-opolzen-mozhet-zasypat-reku-bureyu-v-habarovskom-krae/>

ЗАХАРОВА Л.Н.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область, Россия, ludmila@sunclass.ire.rssi.ru
Адрес: пл. Введенского, д. 1, г. Фрязино, Московская область, 141190, Россия

ЗАХАРОВ А.И.*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область, Россия, aizakhar@ire.rssi.ru

СИНИЛО В.П.

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, Московская область, Россия, sinilo@ire.rssi.ru

Оригинальная статья

Поступила в редакцию 23.08.2022 / Принята к публикации 25.09.2022 / Дата публикации 30.09.2022

© ООО «Геомаркетинг», 2022

Аннотация: в работе представлены результаты интерферометрической обработки и анализа радиолокационных снимков оползневого склона на берегу р. Бурея, сделанных радиолокаторами с синтезированной апертурой (РСА) L-диапазона PALSAR, PALSAR-2 и РСА С-диапазона, установленным на борту спутника Sentinel-1В, в 2006–2018 гг. Показано ограничивающее влияние временной декорреляции радиолокационных сигналов, отраженных залесенной поверхностью берегового склона, вследствие которого из-за малого количества пригодных для интерферометрической обработки архивных данных был использован метод классической дифференциальной интерферометрии. Проведенные измерения скоростей подвижек показали, что сползание оползневого грунта в первую декаду XXI в. может характеризоваться стабильной скоростью движения в течение года. Заметное увеличение годового количества осадков во втором десятилетии в связи с сильными дождями в 2013, 2016 и 2018 гг. привело к значительному ускорению движения оползня в теплое время года с окончательным сходом оползневых масс в декабре 2018 г. Сделано предположение, что заполнение Бурейского водохранилища в 2003–2009 гг. с подъемом воды на 60 м в районе оползня и последующими сезонными колебаниями уровня воды спровоцировало оползневую активность после 2006 г. Совместный анализ интерферометрических измерений движения оползня с цифровыми моделями рельефа оползневого склона показал, что все выявленные методами радарной интерферометрии подвижки поверхности оползневого склона находятся в пределах локального понижения рельефа. Это понижение наблюдается на серии цифровых моделей рельефа, в т.ч. на полученной радиолокационным комплексом SRTM в 2000 г., задолго до наполнения водохранилища и начала работы гидроэлектростанции. Полученные результаты позволили сделать вывод о том, что катастрофическому обрушению 11 декабря 2018 г. предшествовал достаточно длительный этап медленных деформаций, вероятно, активизировавшихся после заполнения Бурейского водохранилища.

Ключевые слова: р. Бурея; оползень; радиолокаторы с синтезированной апертурой; радиолокационная интерферометрия; интерферометрическая когерентность; оценка смещений

Благодарности: работа выполнена по государственному заданию Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Авторы выражают благодарность Европейскому космическому агентству (ESA) за данные со спутника Sentinel-1В, Японскому агентству аэрокосмических исследований (JAXA) — за данные со спутников ALOS и ALOS-2 (радиолокаторы PALSAR-1/2) и Немецкому центру авиации и космонавтики (DLR) — за данные со спутников TanDEM-X.

Ссылка для цитирования: Захарова Л.Н., Захаров А.И., Синило В.П., 2022. Исследование многолетней динамики Бурейского оползня методом космической радиолокационной интерферометрии. ГеоРиск, Том XVI, № 3, с. 20–34, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-3-20-34>.

STUDY OF LONG-TERM DYNAMICS OF THE BUREYA LANDSLIDE USING SPACEBORNE SAR INTERFEROMETRY

LIUDMILA N. ZAKHAROVA

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, Russia; ludmila@sunclass.ire.rssi.ru

Address: Bld. 1, Vvedensky Sq., 141190, Fryazino, Moscow Region, Russia

ALEXANDER I. ZAKHAROV*

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, Russia; aizakhar@ire.rssi.ru

VICTOR P. SINILO

Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, sinilo@ire.rssi.ru

Original paper

Received 23 August 2022 / Accepted 25 September 2022 / Published 30 September 2022

© Geomarketing LLC, 2022

Abstract: the paper presents the results of interferometric processing and analysis of radar images of the landslide slope on the Bureya River bank acquired by L-band synthetic aperture radars (SARs) PALSAR, PALSAR-2 and C-band SAR installed on the Sentinel-1B satellite in 2006–2018. It was shown that the negative effects of the temporal decorrelation of the radar signals scattered by the forested slope surface reduce a number of the SAR data pairs applicable for the interferometric processing. For that reason, the classical differential SAR interferometry method was used in the study. Displacement velocity measurements showed that in the first decade of the 21st century the landslide motion may be characterized by a stable velocity throughout the year. Significant growth of precipitation rate in the second decade due to heavy rainfall in 2013, 2016 and 2018 led to acceleration of the landslide movement in the warm season with the final catastrophic landfall in December 2018. Presumably, Bureya Reservoir filling in 2003–2009 followed by 60 m rise of water level in the landslide vicinity and subsequent seasonal fluctuations in the water level triggered landslide activity after 2006. Joint analysis of interferometric measurements and digital elevation models (DEMs) of the landslide slope demonstrated that all displacements detected by radar took place within the local depression. This depression appears on the SRTM DEMs acquired in 2000, long before the reservoir was filled and the hydroelectric power plant began operating. The obtained results allowed us to conclude that the catastrophic collapse on 11 December 2018 was preceded by a rather long stage of slow deformations that activated probably after the filling of the Bureya Reservoir.

Key words: Bureya River; landslide; synthetic aperture radar (SAR); SAR interferometry; interferometric coherence; displacement estimation

Acknowledgments: the work was carried out according to the state assignment of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences. The authors are grateful to the European Space Agency (ESA) for data from the Sentinel-1B satellite, the Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA) for data from the ALOS and ALOS-2 satellites (PALSAR-1/2 radars), and the German Aerospace Center (DLR) for data from the TanDEM-X satellites.

For citation: Zakharova L.N., Zakharov A.I., Sinilo V.P., 2022. Study of long-term dynamics of the Bureya landslide using spaceborne SAR interferometry. *GeoRisk World*, Vol. XVI, No. 3, pp. 20–34, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2022-16-3-20-34>.

Введение

Грандиозный оползень, сошедший 11 декабря 2018 г. в Бурейское водохранилище на Дальнем Востоке, привлек большое внимание как в связи с масштабом события, так и из-за того, что вынесенный грунт перекрыл водохранилище, что грозило подъемом его уровня выше по течению и затоплением прибрежных населенных пунктов, особенно в период весеннего половодья, а также нарушением нормальной эксплуатации ГЭС. Само по себе событие, несмотря на серьезный масштаб, не вызвало мгновенных негативных последствий, поскольку произошло в ненаселенной местности. Образовавшаяся запруда, однако, являлась в перспективе серьезной угрозой, и для восстановления водотока были привлечены силы

Министерства обороны РФ, с помощью серии взрывов в январе 2019 г. создавшие в насыпи проран вблизи южного (левого) борта водохранилища.

На место были организованы две экспедиции: одна вскоре после схода оползня, в январе 2019 г., и вторая — летом того же года для изучения последствий схода оползня и выяснения состояния окружающей местности [4]. В ходе полевых исследований были проведены инструментальные и визуальные наблюдения, позволившие сформировать представление о параметрах стенки срыва и тела оползня, характеристиках сошедшего грунта и о современных процессах преобразования оползня.

В настоящей работе используются дистанционные методы получения информации. Дистанционное зондирова-

ние с борта аэрокосмических носителей как в оптическом, так и в радиолокационном диапазоне является источником независимой, зачастую уникальной информации о состоянии земной поверхности. Для оптических съемок характерно высокое пространственное разрешение, однако обязательным условием является проведение съемок в светлое время суток в безоблачную погоду. Радиолокационные данные можно получать независимо от облачности и освещенности солнцем, и, кроме того, особые схемы съемки и специальная постобработка (поляриметрическая и интерферометрическая) позволяют проводить дополнительные измерения различных параметров поверхности — например, существуют методики для построения рельефа, для оценки влажности и шероховатости почвы, высоты

и плотности растительности и, что важно при изучении оползней, для детектирования динамики поверхности и оценки скорости ее смещения.

Применение космической радиолокационной интерферометрии [18] для изучения оползневых склонов началось с последнего десятилетия XX в. [9, 13]. Для оценки смещений использовалась дифференциальная (разностная) схема интерферометрической обработки, в которой необходимым компонентом является цифровая модель рельефа (ЦМР), которая может быть получена либо из независимого источника, либо из дополнительной интерферометрической пары, между съемками которой заведомо не происходило смещений поверхности, при этом точность источника информации о рельефе имеет критическое значение [7].

Ключевым параметром в интерферометрии является когерентность сигналов между снимками интерферометрической пары, снижение которой приводит к потере информации об интерферометрической разности фаз и, следовательно, о динамике поверхности и/или рельефе. В схеме съемки с повторяющихся траекторий носителя одной из причин снижения когерентности является временная декорреляция сигналов вследствие изменения отражательных свойств поверхности за время между съемками. Наличие растительного покрова является одной из главных причин декорреляции эхо-сигналов за время между съемками вследствие ветровых колебаний ветвей и листьев крон деревьев, дождевых осадков, вариаций влажности и состояния влаги в древесине, влияющих на коэффициент обратного рассеяния и положение фазового центра рассеяния. Она наиболее ярко проявляется для диапазонов с короткой длиной радиоволны (X и C). Временная декорреляция растет с ростом интервала времени между получением снимков интерферометрической пары. Сигналы более длинноволновых диапазонов (L и P), глубже проникающие под кроны деревьев и отражающиеся от крупных ветвей, стволов и почвы, позволяют получать информативные интерферограммы для интервалов в несколько месяцев и даже лет, тогда как сигналы из съемок в X - или C -диапазонах могут полностью декоррелировать даже за несколько дней из-за изменений микрорельефа поверхности масштаба, сравнимого с длиной волны (т.е. первых сантиметров).



Рис. 1. Геометрия интерферометрической съемки. *Обозначения:* A_1 и A_2 — точки съемки первого и второго изображения; P — снимаемая точка на земной поверхности; h — ее высота над некоторой референсной поверхностью; B — расстояние между точками съемки (база интерферометра); H — высота орбиты в первом сеансе съемки; θ — угол обзора

Fig. 1. Interferometric surveying geometry. *Designations:* A_1 and A_2 — surveying points for the first and the second images; P — surveyed point on the earth's surface; h — its height above a reference surface; B — distance between surveying points (interferometric baseline); H — orbit's height for the first survey; θ — incidence angle

Для преодоления препятствий, которые возникают в связи с временной декорреляцией, был предложен ряд методов. При необходимости измерения рельефа и смещений на участках поверхности, покрытых растительностью и подверженных в связи с этим декорреляции, например, размещают трехгранные уголкового отражатели [19, 20], демонстрирующие сильный отраженный сигнал и позволяющие проводить точные измерения смещений по разности фаз. Однако результаты таких измерений справедливы только для точки размещения уголкового отражателя и не дают представления обо всей интересующей области. Другой вариант — статистическая обработка больших наборов снимков выбранной территории с целью выявления так называемых «постоянных отражателей», т.е. объектов, стабильно отражающих сигнал, после чего обработка сосредотачивается на этих выделенных точечных отражателях [12, 15]. Такого рода измерения наиболее эффективны при мониторинге элементов городской и транспортной инфраструктуры, однако в случае с оползнями желательно иметь общую картину деформаций поверхности, которая не всегда восстанавливается по сети точечных отражателей, особенно, если эта сеть редкая. Более современные методы, которые работают с распределенными целями на основе серии изображений, — это

Small Baselines Subset (SBAS) [8, 11, 16, 23] и ряд других [10, 14, 17]. Обзор интерферометрических методов, использующих ряды изображений, можно найти в [21]. В этой работе в силу ограниченности набора имеющихся радиолокационных данных использован классический метод дифференциальной интерферометрии.

Характеристики местности в окрестности оползня

Река Бурей — один из самых многоводных притоков р. Амур в Амурской области на Дальнем Востоке. В среднем течении эта горная река протекает по узкой каньонообразной долине, ширина которой в районе оползня около 1,0–1,5 км. Долина врезана в древнюю поверхность выравнивания на глубину до 400–450 м [5] и имеет асимметричный профиль с крутым левым берегом и заметно более пологим правым. Крутизна берегового склона в районе оползня составляет около 35° . Детальное геологическое описание района можно найти в [2]. Питание реки смешанное, паводки носят муссонный характер. На теплое время года приходится 75–95% осадков. Самый дождливый месяц года — июль с десятью дождливыми днями и месячным количеством осадков до 140 мм. До возведения плотины Бурейской гидроэлектростанции (ГЭС) и соз-

дания Бурейского водохранилища наводнения наблюдались почти ежегодно, катастрофические паводки случались раз в десять лет.

Заполнение чаши водохранилища происходило в период 2003–2009 гг. В результате уровень воды в реке в районе оползня поднялся за три года на 60–70 м [1], ширина водной поверхности увеличилась с 200 до 400 м. Узкая каньонобразная долина реки здесь — это средняя часть 230-километрового водохранилища, протянувшегося от плотины в пгт. Талакан до с. Чекунда. Вследствие работы ГЭС сезонные колебания уровня воды достигают 16–20 м и являются причиной обезлесения в узкой прибрежной полосе на береговых склонах. Они же, вероятно, могли стать триггером оползневых процессов.

Метод дифференциальной радарной интерферометрии

Для изучения истории подвижек поверхности оползня методами радарной интерферометрии были использованы архивные радиолокационные данные *C*-диапазона со спутника Sentinel-1B за 2016–2018 гг. и *L*-диапазона со спутников ALOS и ALOS-2, полученные в периоды 2006–2011 и 2015–2018 гг., соответственно. Схема интерферометрической съемки подразумевает два радиолокационных изображения одного и того же участка земной поверхности, полученных со слегка разнесенных в пространстве точек съемки. Для оценки смещений поверхности подходит схема съемки с повторяющихся орбит: один или несколько носителей двигаются вдоль одной и той же траектории, отклоняясь от нее не более чем на несколько километров или (самые современные) не более чем на несколько сотен метров.

Геометрия интерферометрической съемки приведена на рис. 1. Траектории носителей перпендикулярны плоскости рис. 1. Для измерения высоты рельефа и смещений ключевыми параметрами являются разницы наклонных дальностей $r_2 - r_1$, размер и положение в пространстве базы B (выделяют ее параллельную линии распространения радиосигнала составляющую B^{\parallel} и ортогональную), высота орбиты H и высота рельефа местности h . Для наглядности пропорции на нем искажены: в реальности $B \ll H$, $h \ll H$. Также существенную роль может играть задержка сигнала в атмосфере (ее вклад не отражен на рис. 1).

При интерферометрической обработке пары изображений, полученных с близких орбит носителя, для каждого элемента изображения вычисляется интерферометрическая когерентность:

$$\gamma = \frac{E\{U_1 \cdot U_2^*\}}{\sqrt{E\{|U_1|^2\} \cdot E\{|U_2|^2\}}}, \quad (1)$$

где U_1 и U_2 — комплексные величины сигналов, полученные в первой и второй съемках, соответственно; $E\{\cdot\}$ — пространственное усреднение. Модуль величины γ показывает степень коррелированности сигналов в окрестности текущего элемента изображения и часто для упрощения также называется когерентностью, а ее фазовая составляющая, т.е. разность фаз сигналов из первой и второй съемки $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, зависит от разности наклонных дальностей

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda}(r_2 - r_1), \quad (2)$$

и состоит из нескольких слагаемых: это компоненты, зависящие от рельефа местности $\Delta\varphi_{topo}$, от динамики поверхности за время между съемками $\Delta\varphi_d$, от составляющей $\Delta\varphi_a$ при распространении сигнала в атмосфере, в объемном слое растительности, снега или песка $\Delta\varphi_s$, а также в эту сумму входят случайные фазовые составляющие объемной $\Delta\varphi_{spat}$ и временной $\Delta\varphi_{temp}$ декорреляции, теплового шума $\Delta\varphi_n$ и, наконец, неизвестная начальная фаза $\Delta\varphi_0$:

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_{topo} + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_s + \Delta\varphi_{spat} + \Delta\varphi_{temp} + \Delta\varphi_n + \Delta\varphi_0. \quad (3)$$

В приближенной геометрии съемки составляющая разности фаз $\Delta\varphi_{topo}$, описывающая вариации высот рельефа поверхности, может быть получена дифференцированием (2) по высоте h [6]:

$$\Delta\varphi_{topo} = \frac{4\pi B^{\perp}}{\lambda r_1 \sin \theta} \Delta h, \quad (4)$$

где λ — длина волны радиолокатора, м; r_1 — наклонная дальность до точки съемки P , м; Δh — приращение высоты рельефа в точке съемки относительно некоторого базового уровня, м; B^{\perp} — проекция базы интерферометра B на линию визирования r_1 , м (см. рис. 1).

Составляющая фазы, зависящая от радиального смещения поверхности к

моменту второй съемки, из-за чего наклонная дальность r_2 изменяется на величину Δr_d , может быть получена дифференцированием (2) по r_2 . Эта простая зависимость выглядит следующим образом:

$$\Delta\varphi_d = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r_d. \quad (5)$$

Выделить полезные составляющие фазы из суммы (3) (чаще всего это два первых слагаемых) можно различными методами. К примеру, схема одновременной съемки с помощью дополнительной приемной антенны на штанге или съемки в составе орбитальной группировки близкорасположенных спутников позволяет исключить из рассмотрения динамику поверхности и влияние атмосферы; использование ЦМР позволяет оценить и вычестить влияние рельефа при измерении смещений поверхности; использование атмосферных моделей и/или данных метеоспутников, а также ряд методик, использующих временные ряды данных, позволяет оценивать и устранять атмосферную составляющую; сглаживание данных снижает уровень шума. Исходно неизвестная начальная фаза может быть определена на участках интерферограммы, относящихся к заведомо стабильной поверхности.

В данной работе для выделения компоненты фазы, описывающей динамику поверхности, был использован классический метод дифференциальной интерферометрии, в котором топографическую фазу оценивали по данным ЦМР и вычитали из (3). Компоненты фазы, порожденные атмосферой и снежным покровом в зимних съемках, также как и неизвестную начальную фазу оценивали по сигналам близлежащих стабильных участков поверхности и вычитали. Для снижения шумов на интерферограмме была выполнена пространственная фильтрация измерений.

Особенности когерентности сигналов *L*- и *C*-диапазонов

Точность измерения разности фаз на интерферограмме определяется степенью когерентности сигналов. Модуль когерентности γ (1) принимает значения в интервале от 0 до 1, где 0 соответствует полной декорреляции сигналов, а 1 — их полной коррелированности. Как показывает практика, значения модуля когерентности ниже 0,3 не позволяют проводить площадные измере-

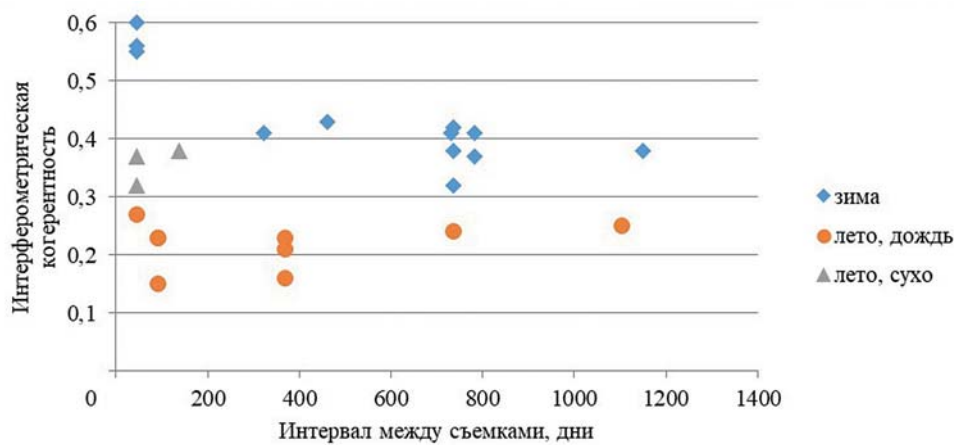


Рис. 2. Интерферометрическая когерентность для пар снимков с радиолокатора PALSAR-1

Fig. 2. Interferometric coherence for PALSAR-1 interferometric pairs

ния фазы, и, следовательно, смещений поверхности, а наиболее достоверны измерения разности фаз, проведенные при когерентности, превышающей величину 0,5. Однако даже и без измерений смещений сами по себе колебания значений когерентности позволяют делать некоторые заключения об отражательных свойствах поверхности. К примеру, снижение когерентности свидетельствует об изменении отражательных свойств поверхности за время между съемками. Эти изменения могут быть связаны как с изменениями микрорельефа поверхности (в результате строительных работ, вспашки почвы, ветрового колебания ветвей деревьев и т.д.), так и с колебаниями ее электрических свойств (меняющаяся влажность напрямую влияет на диэлектрическую проницаемость среды и, как следствие, на уровень и фазу отраженного сигнала).

В *L*-диапазоне, в силу проникновения сигнала глубже под растительность или в толщу сухого снега, когерентность может сохраняться достаточно высокой для интервалов между съемками в несколько недель, месяцев и даже лет. При этом метеоусловия в момент съемки и за несколько дней до нее продолжают играть существенную роль, поэтому когерентность может быть низкой для пары с интервалом несколько недель, если условия съемки были разными (например, дождь в один из дней съемки и сухая погода в другой) и высокой для пары с годичным интервалом, если съемки были проведены в приблизительно похожих погодных условиях. Таким образом, для умеренных широт из рассмотрения сразу исключаются пары, одно из изображений

которых снято в морозное время года, а второе — в теплое: их когерентность заведомо низкая. Подробно результаты измерений в *L*-диапазоне по данным радиолокаторов PALSAR-1/2 рассмотрены в следующем разделе.

Данные *C*-диапазона даже при небольшом интервале между съемками (который составляет 12 дней для спутника Sentinel-1B) могут сильно декоррелировать под влиянием изменяющихся метеоусловий и состояния растительности, поэтому имеет смысл сосредоточиться на цепочках интерферометрических пар данных с этим минимально доступным интервалом. Даже среди пар снимков с 12-дневным интервалом у большей части наблюдается полная декорреляция отраженных сигналов, как будет показано в следующем разделе.

Другие миссии *C*-диапазона, архивные данные которых доступны для района оползня, имеют еще больший интервал между съемками: это спутники ERS-1/2, действовавшие с 1991 по 2011 гг. и Envisat, работавший в 2002–2012 гг. Еще более уязвим к действию временной декорреляции сигнал радиолокатора спутника TerraSAR-X, относящийся к *X*-диапазону с длиной волны 3,1 см, данные которого доступны с 2007 г. Ни одной пары сцен, подходящей для интерферометрических измерений смещения, в архивах данных этих четырех спутников не нашлось.

Таким образом, основные результаты работы получены по данным с радиолокаторов PALSAR-1/2 (*L*-диапазон, 2006–2010 и 2014–2018 гг.) и радара, установленного на спутнике Sentinel-1B (*C*-диапазон, 2016–2018 гг.).

Интерферометрическая обработка данных спутниковых радиолокаторов с синтезированной апертурой

Данные радиолокаторов с синтезированной апертурой *L*-диапазона

Архив данных японского радиолокатора *L*-диапазона PALSAR, установленного на борту спутника ALOS (в статье обозначен как PALSAR-1, чтобы отличать его от радиолокатора PALSAR-2, работавшего на следующем в серии спутнике ALOS-2), предоставляет данные по территории, включающей оползневой склон на р. Буря, с мая 2006 г. по октябрь 2010 г. Для *L*-диапазона (рабочая длина волны PALSAR-1 — 23,6 см) наличие растительности на оползневом склоне не является препятствием для построения интерферограмм с достаточно большим интервалом между съемками за счет более глубокого проникновения радиосигнала под растительность и радиопрозрачности в этом диапазоне мелких элементов растительности (листьев, хвои, мелких веточек), наиболее подверженных мелкомасштабным случайным колебаниям из-за погодных условий. Преимуществом *L*-диапазона является, как правило, возможность совместно обрабатывать пары изображений с интервалом между съемками, составляющим год или даже два — три года. Такие длинные интервалы позволяют, во-первых, отслеживать очень медленные смещения, которые незаметны на интервалах в дни, недели и первые месяцы, а во-вторых, подбирать пары, снятые в одно и то же время года в приблизительно одинаковых погодных условиях для обеспече-

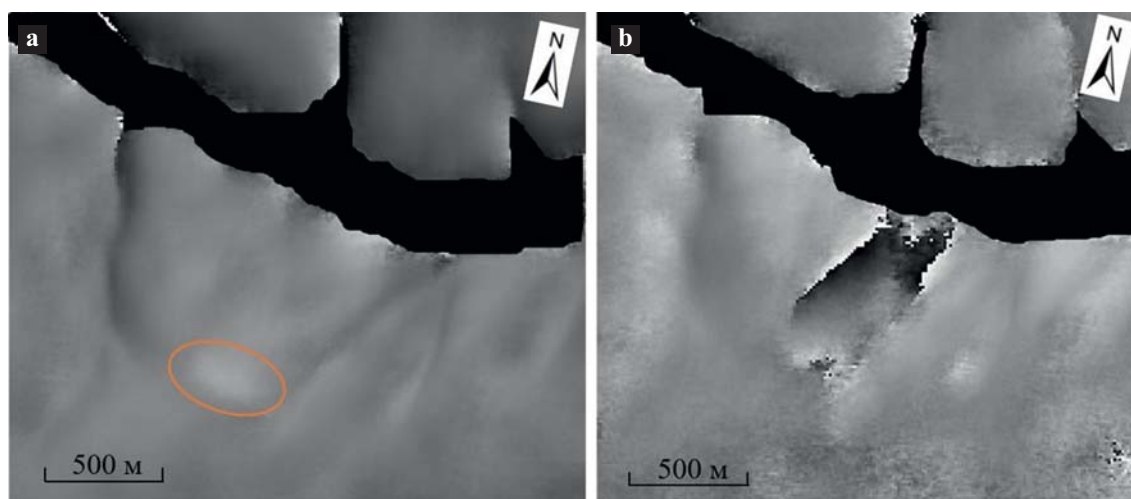


Рис. 3. Фрагменты интерферограмм с радиолокатора PALSAR-1: а — пара с интервалом 46 дней; б — пара с интервалом два года. *Обозначения:* оранжевый овал — верхняя часть оползня, где присутствует светлое пятно, свидетельствующее о наличии смещений

Fig. 3. PALSAR-1 interferograms' fragments: a — pair with 46-days interval; b — pair with pair with 2-years interval. *Designations:* orange ellipse — the upper part of the landslide, where light tones indicate presence of displacements

ния достаточно высокой когерентности сигналов. При этом пары снимков с малым временным интервалом между съемками, но охватывающие, к примеру, период весеннего таяния, могут демонстрировать полную декорреляцию и быть непригодными для измерения смещений.

Обязательным требованием к радарным съемкам для последующей интерферометрической обработки снимков является их проведение с одной и той же условной трассы в схеме съемки с повторяющихся орбит. Период повторения орбиты спутника ALOS, удовлетворяющий требованиям интерферометрической обработки, составлял 46 дней, однако съемки проводились реже, к тому же с четырех различных условных трасс. Данные с разных трасс комбинировать для интерферометрической обработки нельзя, поэтому далее рассмотрена каждая трасса в отдельности.

На трассе с максимальным доступным количеством съемок за неполные четыре года с января 2007 г. по октябрь 2010 г. имеется 18 сцен, пригодных для интерферометрической обработки. Формально из них можно составить $(18 \cdot 17) / 2 = 153$ пары, однако когерентность выше 0,5 на территории оползня из них показывают всего две (и обе — зимние, снятые в пределах одной зимы с интервалом 46 дней), а выше 0,3 — 12 пар, из которых две летних и десять зимних, при этом обе летние сняты с минимальным (т.е. 46-дневным) интервалом в пределах одного лета, а среди зимних имеются как пары с

46-дневным интервалом, так и с интервалом в один год и даже два года.

Другая орбитальная трасса с 10 сценами с радиолокатора PALSAR-1 содержит всего шесть пар с когерентностью выше 0,3 (из 45 возможных комбинаций сцен), все они зимние: три пары в пределах одной зимы 2009–2010 гг., а три остальных охватывают период около двух лет (первый снимок всех трех этих «длинных» пар получен в декабре 2007 г., а второй относится к зиме 2009–2010 гг.). При этом только одна пара из этих шести имеет когерентность на оползне выше 0,5.

Есть также трасса, содержащая всего четыре последовательные съемки, сделанные в период с мая по октябрь 2006 г., и из возможных шести пар, составленных из них, значения когерентности выше 0,3 имеют четыре пары: три из них с минимальным интервалом 46 дней, а одна — с максимальным, охватывающим четыре с половиной месяца. Ни одной пары с когерентностью выше 0,5 на этой трассе нет. В то же время трасса содержит наиболее ранние из доступных данных, причем эти данные получены как раз в период заполнения водохранилища, поэтому эта трасса весьма ценна для анализа динамики оползневого склона.

Четвертая трасса содержит всего одну пару с низкой когерентностью (меньше 0,2), потому в дальнейших анализах не участвует.

На рис. 2 сведены вместе значения интерферометрической когерентности для пар снимков с радиолокатора

PALSAR-1 на территорию оползня в зависимости от интервала между съемками и погодных условий.

Видно, что данные с радиолокатора PALSAR-1 демонстрируют наилучшую когерентность для зимних пар с коротким интервалом. При увеличении интервала между съемками когерентность снижается. Среди летних пар максимальную когерентность демонстрируют те, в которых обе съемки пришлись на сухую погоду, однако величина этой когерентности близка к когерентности худших зимних пар. Пары с хотя бы одной дождливой летней датой имеют когерентность, не превышающую 0,3.

Более надежными при изучении таких медленных смещений являются измерения, сделанные с разницей в год или два, потому что при той же средней скорости смещения подвижки становятся более заметными на окружающем фоне. Кроме того, выбирая для обработки съемки, сделанные в летнее время с интервалом около года, можно снизить влияние вегетационного цикла растительности, которого невозможно избежать при съемках внутри одного теплого сезона с такими значительными для растительного цикла интервалами, как 46 дней.

На рис. 3 приведены примеры интерферограмм, построенных по данным с радиолокатора PALSAR-1, которые включают район оползня. На одной из них интервал между съемками составляет 46 дней (январь — март 2010 г.), на другой — чуть более двух лет (пер-

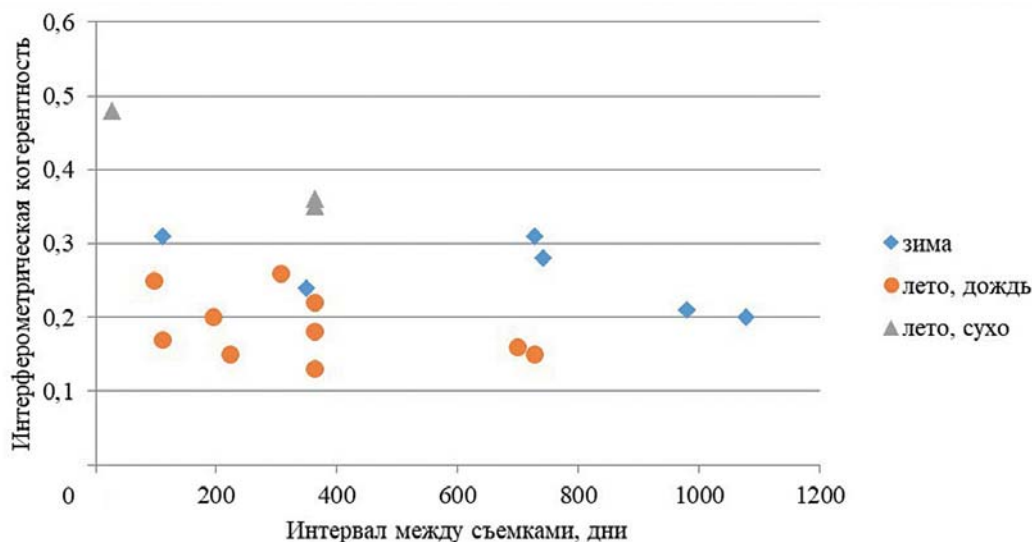


Рис. 4. Интерферометрическая когерентность для пар снимков с радиолокатора PALSAR-2

Fig. 4. Interferometric coherence for PALSAR-2 pairs

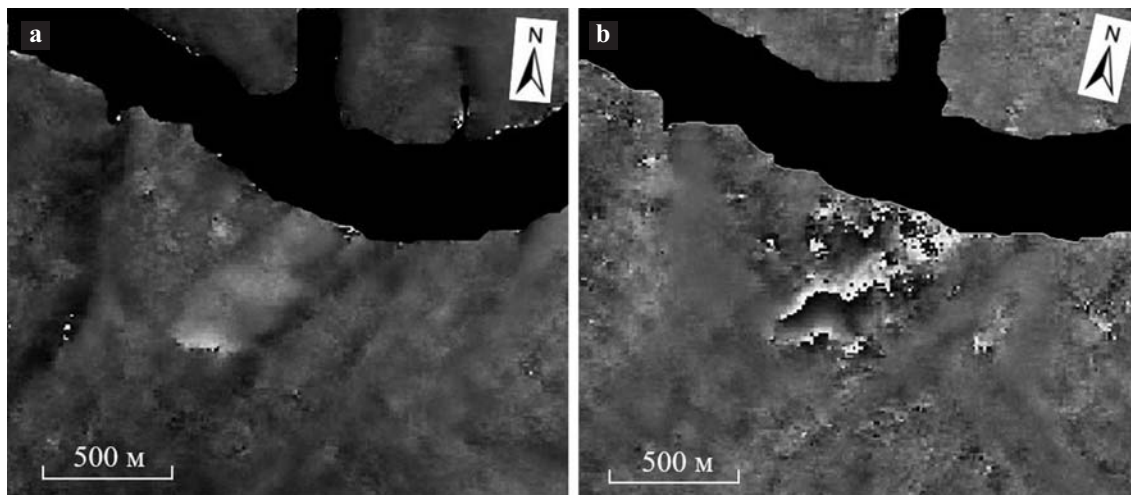


Рис. 5. Фрагменты интерферограмм с радиолокатора PALSAR-2: а — пара с интервалом 28 дней; б — пара с интервалом один год

Fig. 5. PALSAR-2 interferograms' fragments: a — pair with 28-days interval; b — pair with pair with 1-years interval

вая сцена снята в январе 2007 г., вторая — в феврале 2009 г.).

Средняя скорость смещений на этих интерферограммах, будучи пересчитана на направление вдоль по склону, близка к той, которая вычислена по интерферограммам лета 2006 г., и составляет 1,5–2,0 см/мес. При этом на интерферограмме с коротким интервалом (см. рис. 3, а) сложно различить невооруженным глазом отличия в цвете между поверхностью оползня и соседними склонами, и только в верхней части оползня имеется светлое пятно (отмечено оранжевым овалом), свидетельствующее о наличии смещений. На двухгодичной же интерферограмме (см. рис. 3, б) область с накопленным за это

время смещением имеет четко очерченные границы по всей длине оползня: от верхней части до русла реки.

Все полученные измерения по данным с радиолокатора PALSAR-1 — пять летних и 15 зимних — дают значения смещений по склону, не превышающие 2 см/мес. Они охватывают период с 2006 по 2010 гг.

Данные с радиолокатора PALSAR-2 по территории оползня относятся к более позднему периоду: спутник ALOS-2 с этим радаром был запущен в 2014 г., и архив Японского агентства аэрокосмических исследований (JAXA) располагает данными по территории оползня, начиная с этого года. Преимущества и недостатки, которые были названы для

данных с радиолокатора PALSAR-1, справедливы и для PALSAR-2: длина волны 24 см позволяет анализировать интерферограммы с длинным интервалом между съемками, за который успевают накопиться заметные смещения, при этом съемки проводятся нерегулярно, так что необходимо тщательно подбирать пары, исходя как из пространственной близости точек съемки, так и из погодных условий в месте съемки.

За четыре года (с начала работы радиолокатора PALSAR-2 до схода оползня в декабре 2018 г.) съемки проводились с двух условных трасс, на которых было снято всего восемь и семь сцен, соответственно. Оба набора данных содержат сцены, полученные и в теплое,

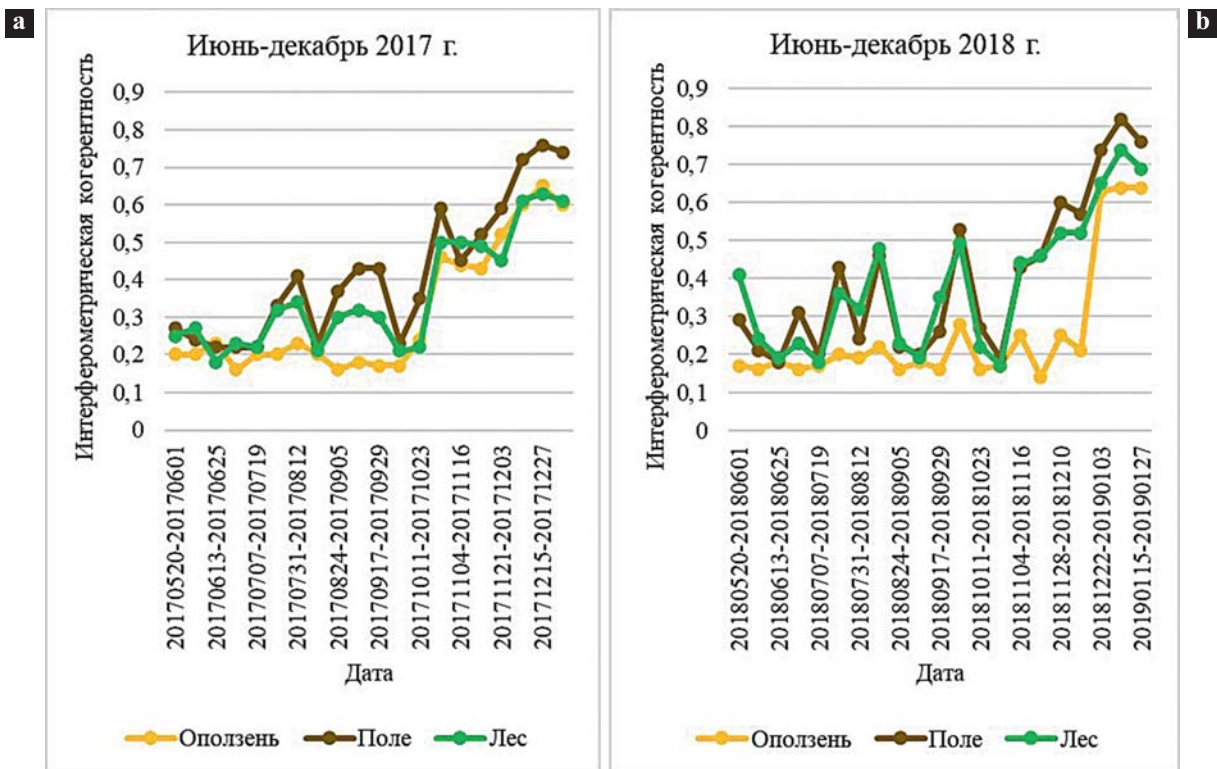


Рис. 6. Величины интерферометрической когерентности по трем участкам (оползень, лесной склон, открытая территория) для второй половины: а — 2017 г.; б — 2018 г.

Fig. 6. Interferometric coherence values for three test sites (landslide, forested slope, non-forested area) for the second half of: a — 2017; b — 2018

и в холодное время года, что сокращает количество доступных комбинаций для получения информативных интерферограмм. К сожалению, набор данных таков, что ни на одной паре значения интерферометрической когерентности не превышают 0,5, а пар с когерентностью выше 0,3 всего пять. Из этих пяти пар по двум трассам три относятся к летним съемкам и две к зимним.

В наборе данных с радиолокатора PALSAR-2 преобладали летние даты, и, кроме того, нет ни одной зимней пары с интервалом короче 100 дней. Поэтому лучшую когерентность из всего набора показывают пары, снятые в сухую погоду летом: внутри одного сезона и с интервалом около одного года (рис. 4).

Две интерферограммы с радиолокатора PALSAR-2 с коротким и длинным интервалами между съемками приведены на рис. 5. На интерферограмме с интервалом 28 дней (см. рис. 5, а) хорошо заметны светлые тона не только в верхней части оползня, как на рис. 3, а, но и вдоль всего склона. Таким образом, в 2016 г. более интенсивные смещения по сравнению с 2010 г. зафиксированы в интервале времени, длина которого в полтора раза короче (28 дней против 46).

Интерферограмма с годичным интервалом (с июня 2015 г. по июнь

2016 г.) на рис. 5, б содержит несколько интерференционных полос на теле оползня (переход разности фаз через значение 2π заметен в верхней части оползня, а также в виде волнообразной линии, пересекающей область оползня по диагонали), причем разность фаз растет с приближением к будущей стенке отрыва, что говорит о том, что там происходят самые заметные смещения по сравнению с нижней частью оползня. Две полных интерференционных полосы соответствуют смещению по склону 62,5 см/год, или 5,2 см/мес.

Оба набора данных L -диапазона (с радиолокаторов PALSAR-1 и PALSAR-2) позволяют проследить следующие общие закономерности: летние пары с хотя бы одной дождливой датой имеют когерентность явно ниже 0,3 и непригодны для оценки смещений по фазовой информации. Зимние пары имеют когерентность лучше летних, при этом имеется тренд на снижение когерентности с увеличением интервала между съемками вследствие временной декорреляции. Летние пары, снятые в сухую погоду, являются наилучшими среди всех летних, и демонстрируют когерентность от 0,35 до 0,50 в пределах одного теплого сезона или с годичным интервалом. Наилучшая когерентность из

всех обработанных данных L -диапазона наблюдается у зимних пар с минимальным интервалом.

Данные радиолокатора с синтезированной апертурой C -диапазона

Радиолокатор спутника Sentinel-1B работает в C -диапазоне (длина волны радиолокатора — 5,6 см). Сигналы этого диапазона более чувствительны к мелкомасштабным смещениям элементов растительности по сравнению с L -диапазоном, поэтому практически невозможно получить информативную интерферограмму с интервалом более месяца. Период повторения орбиты спутника Sentinel-1B составляет 12 дней, и съемка проводится регулярно с каждой повторяющейся орбиты. Таким образом, за год накапливается около трех десятков сцен, но, учитывая особенности изучаемого участка (покрыт лиственным лесом), из них обработке подлежат только соседние по времени, с интервалами 12, 24 или 36 дней (последние, как правило, сильно декоррелированы).

На графиках (рис. 6) представлены величины когерентности на следующих трех участках: лесной участок неподалеку от оползневого склона, собственно

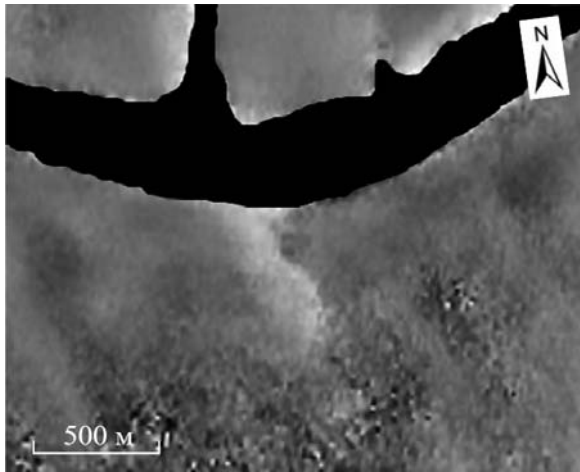


Рис. 7. Фрагмент интерферограммы со спутника Sentinel-1B, построенной по паре 15–27 декабря 2017 г.

Fig. 7. Sentinel-1B interferogram fragment for 15–27 December 2017 pair

оползень (верхняя часть) и территория, покрытая редкой или кустарниковой растительностью недалеко от русла р. Буреи. На рис. 6, *a* представлена вторая половина 2017 г. (с июня до конца декабря), а рис. 6, *b* — такой же период 2018 г. На обоих рисунках видно, что минимальное из трех значений когерентности почти для всех интерферометрических пар соответствует оползню (желтая линия).

В 2017 г. (см. рис. 6, *a*) первые пять измерений свидетельствуют о полной декорреляции для всех трех тестовых участков, далее когерентность на лесном склоне и открытой территории демонстрирует более высокие значения, при этом когерентность сигнала на оползне остается низкой. Аналогичные пики видны на рис. 6, *b* с самого начала измерений. Причина улучшения коррелированности сигналов на естественных протяженных участках в это время года, как правило, заключается в том, что отражающая поверхность, прогреваемая солнцем, высыхает, и условия отражения сигнала при съемке первого и второго изображения пары меняются слабо. Пониженную же когерентность оползневой области можно объяснить заметными изменениями отражающей среды, вызванными смещением поверхности, выражающимися в т.ч. и в наклонах стволов деревьев (эффект «пьяного леса»).

В середине осени 2017 г. (см. рис. 6, *a*) когерентность на всех трех участках становится заметно выше: сказываются заморозки, стабилизирующие отражающую поверхность и улучшающие корреляцию сигналов на

столько, что фазовая составляющая становится информативной и позволяет проводить измерения смещений. Измерения, сделанные зимой 2017–2018 г. (см. рис. 6, *b*), показывают, что смещения на поверхности оползня не прекращались в зимнее время и составили в среднем 10 мм/мес. (более подробно величины смещений обсуждаются в следующем разделе). Летом 2018 г. картина была аналогичной с предыдущей: значительный подъем когерентности для поверхности лесного склона и открытой территории сопровождается лишь небольшими колебаниями когерентности для поверхности оползня в пределах значений, которые делают невозможным измерение смещений интерферометрическим методом, но позволяют сделать заключение о заметном изменении отражательных свойств поверхности за время между съемками. С началом заморозков зимой 2018 г. когерентность для поверхности лесного склона и открытой территории заметно растет, однако этого не происходит с оползневой частью (см. рис. 6, *b*). Вероятно, в недели холодной погоды, непосредственно предшествовавшие катастрофическому обрушению склона в декабре 2018 г., подвижки оползневой части продолжались, вследствие чего неизбежные мелкомасштабные деформации поверхности оползня были причиной потери когерентности сигналов. Три последних даты на рис. 6, *b* соответствуют измерениям когерентности уже после даты схода оползня, и на них видно, что когерентность на новой поверхности почти «догнала» когерентность лесного и открытого участков.

Типичный вид интерферограммы для двух упомянутых холодных сезонов по данным со спутника Sentinel-1B на период до схода оползня показан на рис. 7. В отличие от интерферограммы на рис. 3, *a*, хорошо заметные смещения, обозначаемые более светлым тоном по отношению к окружающему фону, имеются здесь по всей длине оползня, а не только в верхней его части.

Обсуждение результатов измерений

На рис. 8 представлен объединенный график оцененных средних скоростей смещения по данным всех трех спутников: ALOS в период 2006–2010 гг., ALOS-2 в период 2015–2017 гг. и Sentinel-1B для двух зимних сезонов. Поскольку радиолокационная интерферометрия позволяет измерять только составляющую смещения в направлении на спутник, было учтено наиболее вероятное направление смещения (вниз по склону) и произведен пересчет разностей фаз в средние скорости смещения с учетом рельефа, геометрии съемки и интервала между съемками.

Горизонтальная шкала на рис. 8 выбрана условно-хронологической: в двух правых частях, касающихся двух зимних сезонов съемок со спутника Sentinel-1B, хронологический порядок соблюден, поскольку приведены измерения, сделанные по цепочке 12-дневных интерферометрических пар, следующих друг за другом (вторая сцена из предыдущей пары является первой сценой из последующей), а в двух левых частях графика интервалы между съемками спутников ALOS и ALOS-2 очень разные, причем для некоторых пар накладываются. Поэтому в левой части рис. 8 упорядочение условное: по дате первой съемки; кроме того, последнее измерение спутника ALOS-2, охватывающее теплый сезон 2017 г. (20170322–20171115), относится по времени съемки к промежутку между двумя сезонами спутника Sentinel-1B, однако оставлено в левой части графика вместе с остальными измерениями, сделанными по *L*-диапазону. Следует отметить, что значение скорости смещения в этой паре (10 см/мес.) близко к высоким значениям начала измерений в октябре 2017 г., полученным по данным со спутника Sentinel-1B с наступлением холодного времени года (от 10 до 17 см/мес., см. первые четыре измерения самой правой части графика на

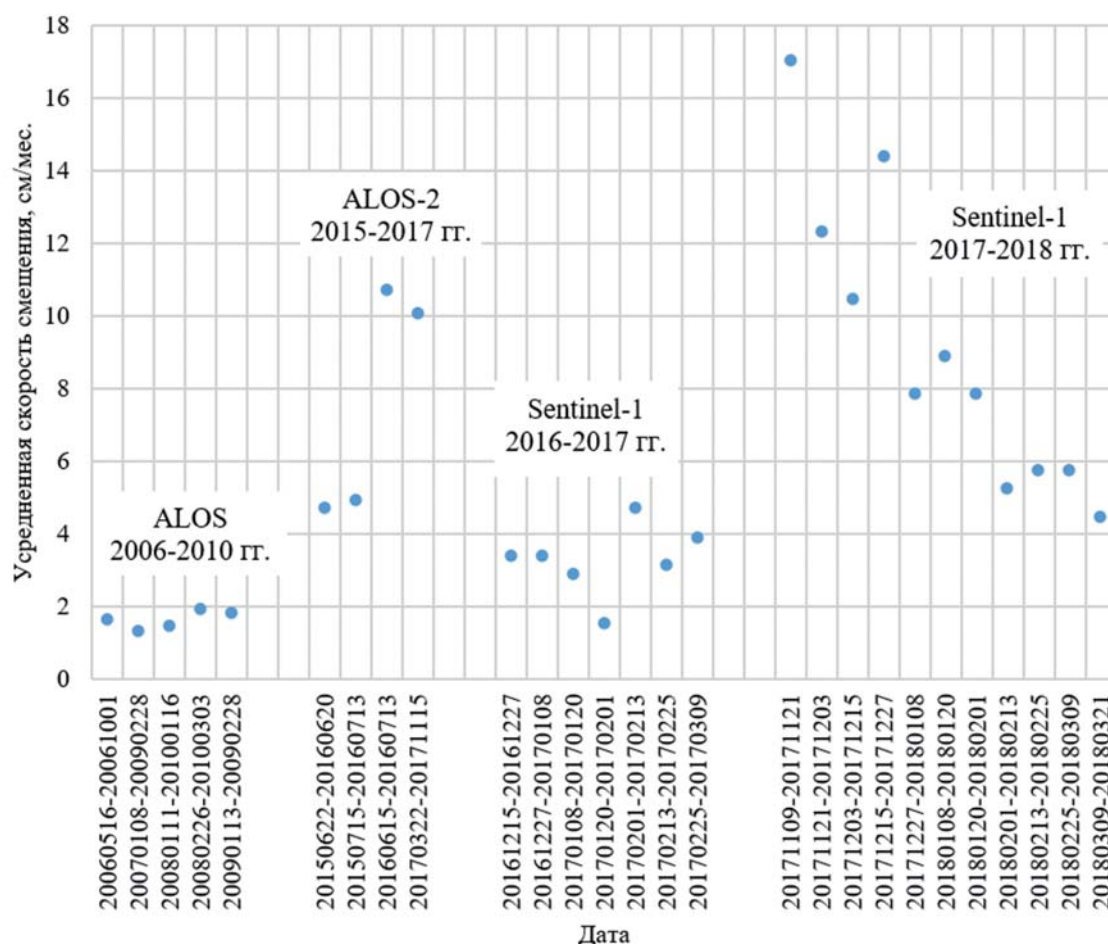


Рис. 8. Величины усредненных скоростей смещения по данным трех радиолокаторов (спутники ALOS, ALOS-2 и Sentinel-1B)
 Fig. 8. Average displacement velocities for three interferometric SAR instruments (ALOS, ALOS-2, and Sentinels-1B satellites)

рис. 8). Это соответствует предположению о том, что в теплое время года оползень движется быстрее. Затем, начиная с января 2018 г., скорость снижается почти до тех же значений, которые наблюдались зимой 2016–2017 гг. (третья часть графика на рис. 8).

Заметные отличия в скоростях смещений на рис. 8 в разных его частях могут быть объяснены влиянием дождевых осадков на развитие оползневой процесса. График годового объема осадков с 2006 по 2019 гг., построенный по данным веб-архива www.gp5.ru, приведен на рис. 9. Судя по метеоданным, до 2010 г. годовое количество осадков не превышало 650 мм/год, затем прослеживается тенденция к росту с локальными максимумами в 2010, 2013 и 2016 гг. Увеличением объема осадков можно объяснить различия в скоростях смещения, измеренных по данным спутника ALOS в 2006–2009 гг. и спутника ALOS-2 в 2015–2017 гг. на рис. 8, а также различия между первыми двумя и последними двумя измерениями спутника ALOS-2: первые две пары за-

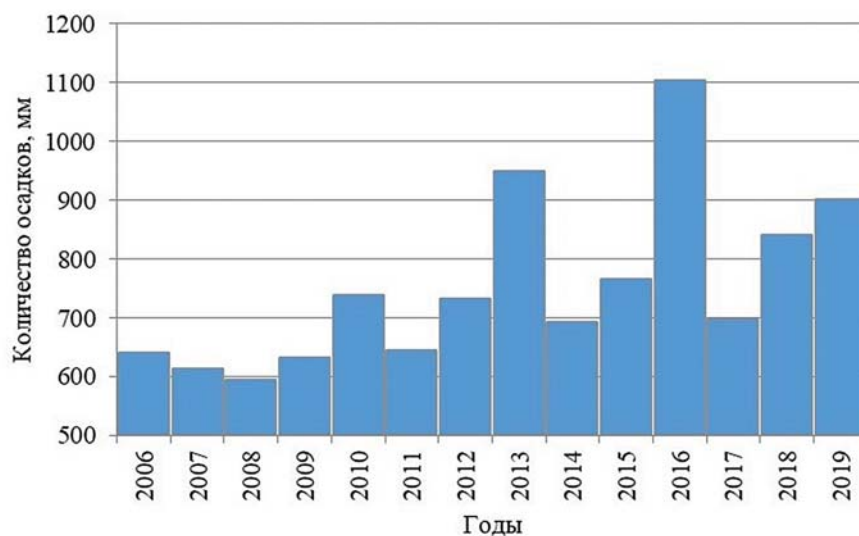


Рис. 9. Годовое количество осадков по данным метеостанции «Сектагли» (~ 35 км к западу от оползня)

Fig. 9. Annual precipitation according to Sektagli weather station data (~ 35 km west of the landslide)

хватывают только начало рекордно дождливого сезона 2016 г., а вторые демонстрируют его последствия (увеличившаяся скорость смещения).

Различия в измерениях по данным со спутника Sentinel-1B, проведенные в два зимних сезона, помогают прояснить более подробный график осадков, совме-

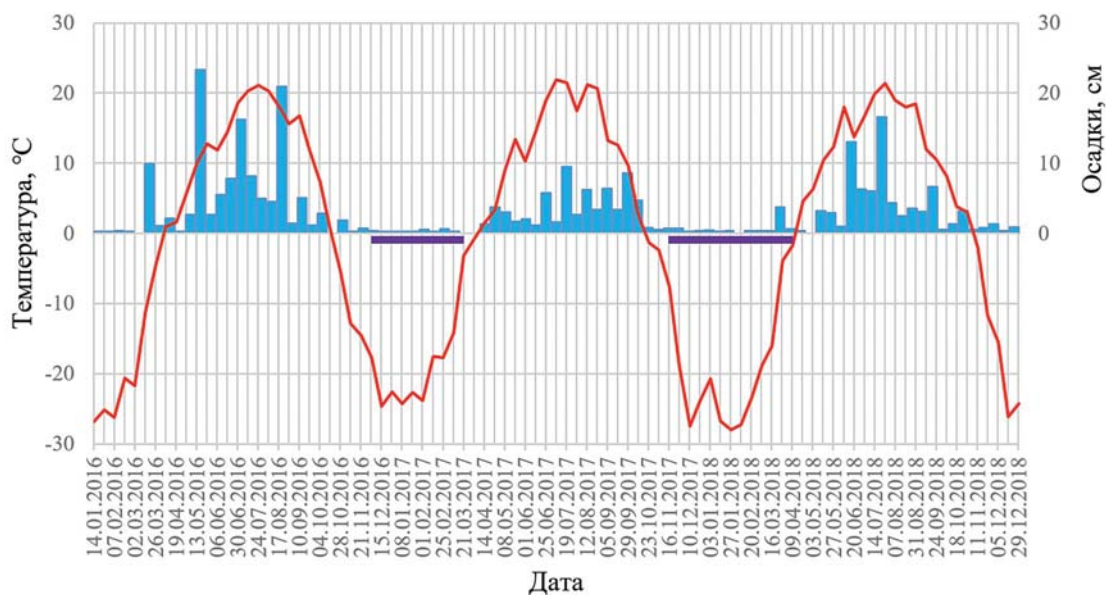


Рис. 10. Температура (красная линия) и осадки (синие столбики) в 2016–2018 гг. по данным метеостанции «Сектагли». *Обозначения:* фиолетовыми отрезками показаны интервалы измерений со спутника Sentinel-1В зимой 2016–2017 и 2017–2018 гг., приведенных на рис. 8

Fig. 10. Air temperature (red curve) and precipitation rate (blue column) for 2016–2018 according to Sektagli weather station data. *Designations:* purple segments mark two periods of Sentinel-1B measurements in winter 2016–2017 and 2017–2018

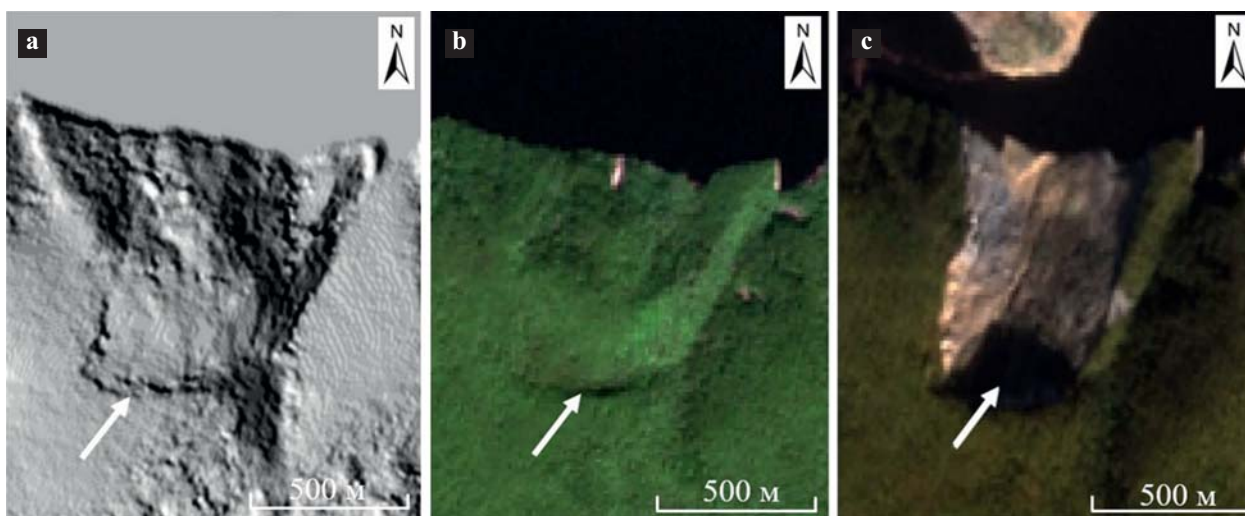


Рис. 11. Фрагменты изображений, содержащие область оползня: а — искусственно подсвеченный рельеф на основе данных со спутника TanDEM-X; б — изображение, полученное оптическим сенсором спутника Sentinel-2 до схода оползня; с — изображение, полученное оптическим сенсором спутника Sentinel-2 после схода оползня. *Обозначения:* стрелкой отмечено положение стенки отрыва оползня, образовавшейся в декабре 2018 г.

Fig. 11. Images' fragments including the landslide area: а — shadowed relief using TanDEM-X satellite data; б — Sentinel-2 optic image before the landslide event; с — Sentinel-2 optic image before the landslide event. *Designations:* arrow points to the position of the main scarp formed in December 2018

щенный с графиком температуры воздуха (рис. 10). Интервал накопления осадков и усреднения температуры на рис. 10 выбран 12-дневным, чтобы он соответствовал частоте наблюдений со спутника Sentinel-1В. Фиолетовыми отрезками под горизонтальной осью на рис. 10 показаны периоды двух зимних серий съемок спутника Sentinel-1В с достаточно высокой интерферометрической когерентностью, позволяющей проводить изме-

рения смещений. Зимой 2017–2018 гг. этот отрезок (правый из двух) почти точно соответствует морозному периоду (т.е. когерентность была достаточно высокой только в холодное время года). Начало съемок зимой 2016–2017 гг. ограничено не погодными условиями, а наличием в архиве данных со спутника Sentinel-1В данных с 12-дневными интервалами, поэтому никак не связано с графиком температуры, а правый конец

фиолетового отрезка в этом сезоне снова близок к переходу температуры через ноль в сторону положительных значений, поскольку при наступлении весеннего таяния когерентность падает, делая менее возможными интерферометрические измерения смещений.

На рис. 10 видно, что 2016 г. был рекордно дождливым, причем основная часть осадков пришлась на начало и середину теплого сезона. Сильное увлаж-

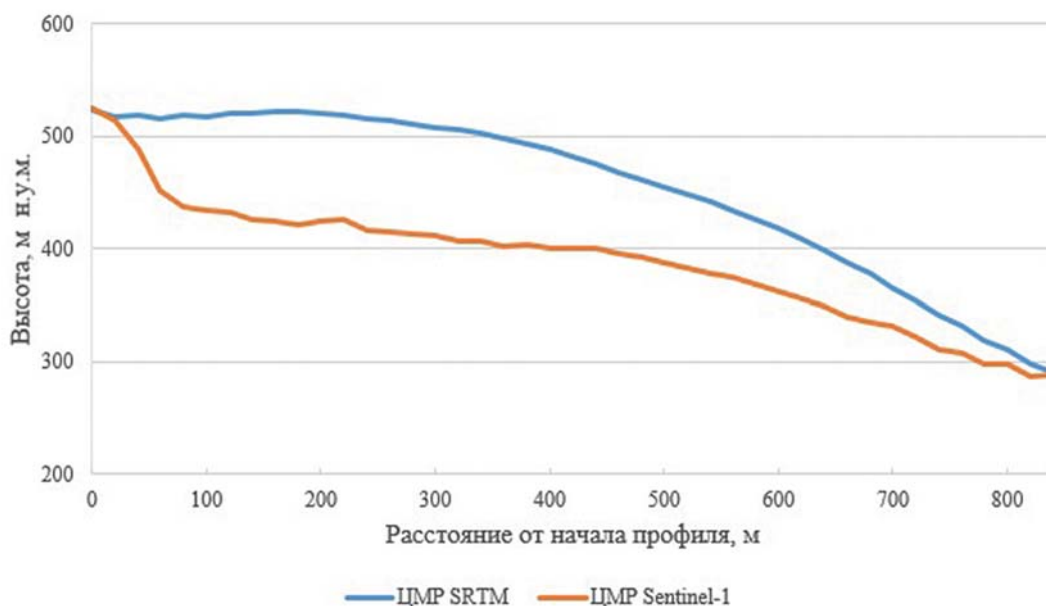


Рис. 12. Профили высот оползневого склона до (синяя линия) и после (оранжевая линия) схода оползня

Fig. 12. Elevation profiles of the landslide slope before (blue curve) and after (orange curve) the event

нение грунта привело к заметному росту скорости оползания: по данным интерферометрической обработки летней пары снимков со спутника ALOS-2 2016 г. она была более 11 см/мес. С начала сентября количество осадков резко сократилось, при этом скорость подвижек оползневых масс ожидаемо снижалась. Через три месяца, к моменту начала измерений со спутника Sentinel-1B в декабре 2016 г., она уменьшилась до величины 4 см/мес. в верхней части оползня и далее практически не менялась в течение всей зимы. В следующем 2017 г. дожди выпали хоть и в меньшем объеме, однако они не прекращались вплоть до заморозков в конце октября и, вероятнее всего, повлияли на повышение скорости смещения грунтовых масс в теле оползня. Поскольку почва и растительный покров промерзают, начиная с верхних слоев, отражательные свойства поверхности уже в начале ноября 2017 г. были достаточно стабильными для получения информативной интерферограммы (см. первую пару из сезона 2017–2018 гг. на рис. 8), а скорости смещений еще мало отличались от летних, поэтому первые измерения в этом сезоне имеют самые большие значения. Затем движение оползня замедлялось, достигнув конце зимы 2017–2018 гг. (правый край четвертой части рис. 8) значений, близких к показателям предыдущей зимы (третья часть рис. 8).

Подводя итоги, можно констатировать, что оползень был активным как минимум с 2006 г., и скорость смеще-

ний колебалась от сезона к сезону, нарастая вплоть до катастрофического схода 11 декабря 2018 г.

Приведенные измерения, убедительно демонстрирующие наличие подвижек оползневых масс на береговом склоне р. Буреи в начале XXI в. и влияние осадков на ускорение оползневой процесса, не дают достаточного объяснения причин его активизации. В работе [3] отмечено, что:

— большая часть оползней имеет унаследованный характер, они возникают и формируются на участках древних оползней;

— оползневые смещения возникают и развиваются, как правило, в первые пять — восемь лет эксплуатации водохранилищ.

Изучение рельефа оползневой участка может дать ответ на вопрос о возможных причинах активизации оползня. На рис. 11, а приведено изображение искусственно освещенного рельефа, построенного по данным топографической миссии спутниковой группировки TanDEM-X, которые были получены в 2012 г., за шесть лет до схода оползня. Точка освещения находится на 245° по азимуту и 50° по углу места. Благодаря таким условиям освещения вдоль склона, имеющего крутизну 35°, неровности его поверхности оказываются хорошо подчеркнутыми. На рис. 11, б показано оптическое изображение, сделанное со спутника Sentinel-2 до схода оползня, а на рис. 11, в — после схода, через семь лет после интерферометри-

ческой съемки со спутниковой группировки TanDEM-X и построения ЦМР.

Стрелками на рис. 11 отмечено положение стенки отрыва оползня, образовавшейся в декабре 2018 г., которая на изображении со спутника Sentinel-2 на рис. 11, с плохо различима из-за скользящего направления солнечного освещения обрывистого уступа оползневой цирка. Видимые на искусственно освещенном рельефе (см. рис. 11, а) темные линии подчеркивают положение уступов, очерчивающих границы понижения в рельефе глубиной 10–30 м в районе стенки отрыва. Проведенный авторами анализ показал, что все подвижки поверхности на оползневом склоне, выявленные в период с 2006 г., происходили в пределах границ обнаруженного понижения, и в той же области впоследствии произошел катастрофический сход оползня. Важно отметить, что этот же контур прослеживается на ЦМР, построенных по данным радиолокационного комплекса SRTM в 2000 г. и с помощью данных с сенсора PRISM, установленного на борту ALOS в 2006–2009 гг. [22]. Следовательно, обнаруженное понижение существовало по меньшей мере в 2000 г., задолго до заполнения водохранилища и начала эксплуатации ГЭС.

Предположение о древнем оползне находит подтверждение при изучении профилей высот оползневой склона. На рис. 12 приведены сечения ЦМР по состоянию на 2000 г. (данные радиолокационного комплекса SRTM) и 2019 г. (ЦМР по данным Sentinel-1B).

Профили идут от верхней части оползня к урезу реки. Максимальная мощность слоя сместившихся оползневых масс в вертикальном направлении составляет около 100 м. Примечательной особенностью профиля по данным радиолокационного комплекса SRTM на расстоянии 50 м от начальной точки по горизонтали является локальное понижение. Это, вероятно, закол, сформировавшийся в верхней части оползня, который мог служить коллектором дождевых осадков. На оптических изображениях закол выглядит как вытянутая темная полоса вблизи стенки отрыва (указана стрелкой на рис. 11, *b*). Эта форма рельефа, равно как и другие морфологические признаки — повышенная неровность поверхности склона в пределах участка будущего обрушения, эрозионная сглаженность краев депрессии — позволяют сделать предположение о достаточно длительном этапе формирования оползня на береговом склоне р. Буреи, в пределах которого и произошло обрушение.

Заключение

Наличие густого лесного покрова на берегах р. Буреи существенно ограничи-

вает возможности применения методов радиолокационной интерферометрии: вследствие зашумления фазовой картины, вызванных временной декорреляцией, надежные измерения динамики оползневого склона в *C*-диапазоне могут быть получены здесь только в сеансах съемки, выполненных в холодное время года и при условии коротких интервалов времени между съемками. Сигналы радиолокаторов *L*-диапазона демонстрируют приемлемо высокую временную когерентность на длинных интервалах при условии, что съемки выполнялись в зимнее время года. Использование пар летних снимков в этом диапазоне также возможно, но ограничено требованием сухой погоды в дни съемки и накануне. Указанные ограничения резко снизили количество пригодных для обработки радиолокационных снимков, они стали причиной использования методики классической дифференциальной интерферометрии, когда каждая интерферометрическая пара снимков анализировалась отдельно.

Тем не менее измерения подвижек оползневого склона по данным радаров PALSAR-1/2 и радиолокатора, установленного на спутнике Sentinel-1B, убе-

дительно демонстрируют развитие оползневого процесса за период 2006–2018 гг. Вероятно, заполнение водохранилища в 2003–2009 гг. с подъемом уровня воды на 60 м и последующими сезонными колебаниями уровня спровоцировали активизацию оползня. Движение оползневого тела в первое десятилетие характеризовалось стабильной скоростью в течение года. Рост годового уровня осадков во втором десятилетии XXI в. с обильными дождями в 2013, 2016 и 2018 гг. привел к заметному ускорению движения, особенно в теплое время года, с окончательным обрушением склона в декабре 2018 г., сразу после резкого похолодания.

Новизна исследования заключается также в выводе о том, что Бурейский оползень, скорее всего, является активизировавшимся древним оползнем, который пребывал в стабильном состоянии до начала XXI в.

Результаты работы подтверждают уникальные возможности радиолокационной интерферометрии при проведении долговременного мониторинга оползневой активности по сравнению с наземными полевыми исследованиями в труднодоступных малонаселенных регионах. 🌐

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н., 2019. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров *L*-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея. Исследование Земли из космоса, № 5, с. 3–14, <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14>.
2. Зеркаль О.В., Махинов А.Н., Кудымов А.В., Харитонов М.Е., Фоменко И.К., Барыкина О.С., 2019. Бурейский оползень 11 декабря 2018 г. Условия формирования и особенности механизма развития. Геориск, Том XIII, № 4, с. 18–30, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-30>.
3. Кондратьева Л.М., 2019. Бурейский оползень и экологические риски. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, № 2, с. 45–55, <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.005>.
4. Махинов А.Н., 2020. Крупный оползень и вызванное им цунами в Бурейском водохранилище. Геоморфология, № 3, с. 31–43, <https://doi.org/10.31857/S0435428120030086>.
5. Махинов А.Н., Ким В.И., Остроухов А.В., Матвеев Д.В., 2019. Крупный оползень в долине реки Бурея и цунами в водохранилище Бурейской ГЭС. Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук, № 2, с. 35–44, <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.004>.
6. Bamler R., Hartl P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. Inverse Problems, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54, <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>.
7. Bayer B., Schmidt D., Simoni A., 2017. The influence of external digital elevation models on PS-InSAR and SBAS results: implications for the analysis of deformation signals caused by slow moving landslides in the Northern Apennines (Italy). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 55, pp. 2618–2631, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2648885>.
8. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
9. Blonda P., Satalino G., Alberga V., Wasowski J., Parise M., Chiaradia M.T., Viggiano R., Pappalepore M., 1999. Soft computing techniques for data classification in a landslide-prone area of Italy. Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS'99), Hamburg, Germany, 1999, Vol. 3, pp. 1600–1602., <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772032>.

10. Fadhillah M.F., Achmad A.R., Lee C.-W., 2022. Improved combined scatterers interferometry with optimized point scatterers (ICOPS) for interferometric synthetic aperture radar (InSAR) time-series analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 60, ID 5220014, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3138763>.
11. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, Issue 9, pp. 3460–3470, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>.
12. Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, Issue 1, pp. 8–20, <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
13. Fruneau B., Achache J., Delacourt C., 1996. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, Vol. 265, Issue 3–4, pp. 181–190, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9).
14. Goel K., Adam N., 2014. A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, Issue 9, pp. 5454–5468, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2289370>.
15. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, Issue 23, ID L23611, <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>.
16. Lv X., Yazici B., Zeghal M., Bennett V., Abdoun T., 2014. Joint-scatterer processing for time-series InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, Issue 11, pp. 7205–7221, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2309346>.
17. Pepe A., Yang Y., Manzo M., Lanari R., 2015. Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise filtering and selection of small baseline multilook DInSAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, Issue 8, pp. 4394–4417, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2396875>.
18. Rodriguez E., Martin J.M., 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, Vol. 139, Issue 2, pp. 147–159, <https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0018>.
19. Xia Y., 2008. CR-Based SAR-interferometry for landslide monitoring. *Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS-2008)*, Boston, MA, USA, 2008, ID 10445445, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779226>.
20. Xia Y., Kaufmann H., Guo X., 2002. Differential SAR interferometry using corner reflectors. *Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS-2002)*, Toronto, Canada, 2002, Vol. 2, pp. 1243–1246, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902>.
21. Xue F., Lv X., Dou F., Yun Y., 2020. A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis. *IEEE Geoscience Remote Sensing Magazine*, Vol. 8, Issue 1, pp. 22–42, <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2956165>.
22. Zakharov A., Zakharova L., 2022. The Bureya landslide recent evolution according to spaceborne SAR interferometry data. *Remote Sensing*, Vol. 14, Issue 20, ID 5218, <https://doi.org/10.3390/rs14205218>.
23. Zhang L., Sun Q., Hu J., 2018. Potential of TCPIInSAR in monitoring linear infrastructure with a small dataset of SAR images: application of the Donghai Bridge, China. *Applied Sciences*, Vol. 8, Issue 3, ID 425, <https://doi.org/10.3390/app8030425>.

REFERENCES

1. Bondur V.G., Zakharova L.N., Zakharov A.I., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dagurov P.N., 2019. Monitoring of landslide processes by means of L-band radar interferometric observations: Bureya River bank caving case. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*, No. 5, pp. 3–14, <https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14>. (in Russian)
2. Zerkal O.V., Makhinov A.N., Kudymov A.V., Kharitonov M.E., Fomenko I.K., Barykina O.S., 2019. Bureya landslide on 11 December 2018. Conditions of the formation and features of the development mechanism. *GeoRisk World*, Vol. XIII, No. 4, pp. 18–30, <https://doi.org/10.25296/1997-8669-2019-13-4-18-30>. (in Russian)
3. Kondratyeva L.M., 2019. Bureysky landslide and ecological risks. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, No. 2, pp. 45–55, <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.005>. (in Russian)
4. Makhinov A.N., 2020. Large tsunami-generated landslide in the Bureysky Reservoir. *Geomorfologiya*, No. 3, pp. 31–43, <https://doi.org/10.31857/S0435428120030086>. (in Russian)
5. Makhinov A.N., Kim V.I., Ostroukhov A.V., Matveenko D.V., 2019. Large landslide in the valley of the Bureya River and tsunami in the reservoir of the Bureya hydroelectric power station. *Vestnik of the Far East Branch of the Russian Academy of Sciences*, No. 2, pp. 35–44, <https://doi.org/10.25808/08697698.2019.204.2.004>. (in Russian)
6. Bamler R., Hartl P., 1998. Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, Vol. 14, No. 4, pp. R1–R54, <https://doi.org/10.1088/0266-5611/14/4/001>.
7. Bayer B., Schmidt D., Simoni A., 2017. The influence of external digital elevation models on PS-InSAR and SBAS results: implications for the analysis of deformation signals caused by slow moving landslides in the Northern Apennines (Italy). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 55, pp. 2618–2631, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2648885>.

8. Berardino P., Fornaro G., Lanari R., Sansosti E., 2002. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 40, No. 11, pp. 2375–2383, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>.
9. Blonda P., Satalino G., Alberga V., Wasowski J., Parise M., Chiaradia M.T., Viggiano R., Pappalepore M., 1999. Soft computing techniques for data classification in a landslide-prone area of Italy. *Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS'99)*, Hamburg, Germany, 1999, Vol. 3, pp. 1600–1602, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1999.772032>.
10. Fadhilah M.F., Achmad A.R., Lee C.-W., 2022. Improved combined scatterers interferometry with optimized point scatterers (ICOPS) for interferometric synthetic aperture radar (InSAR) time-series analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 60, ID 5220014, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3138763>.
11. Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A., 2011. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 49, Issue 9, pp. 3460–3470, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2124465>.
12. Ferretti A., Prati C., Rocca F., 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 39, Issue 1, pp. 8–20, <https://doi.org/10.1109/36.898661>.
13. Fruneau B., Achache J., Delacourt C., 1996. Observation and modelling of the Saint-Étienne-de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, Vol. 265, Issue 3–4, pp. 181–190, [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00047-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00047-9).
14. Goel K., Adam N., 2014. A distributed scatterer interferometry approach for precision monitoring of known surface deformation phenomena. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, Issue 9, pp. 5454–5468, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2289370>.
15. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, Issue 23, ID L23611, <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>.
16. Lv X., Yazici B., Zeghal M., Bennett V., Abdoun T., 2014. Joint-scatterer processing for time-series InSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 52, Issue 11, pp. 7205–7221, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2014.2309346>.
17. Pepe A., Yang Y., Manzo M., Lanari R., 2015. Improved EMCF-SBAS processing chain based on advanced techniques for the noise filtering and selection of small baseline multilook DInSAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 53, Issue 8, pp. 4394–4417, <https://doi.org/10.1109/TGRS.2015.2396875>.
18. Rodriguez E., Martin J.M., 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings F (Radar and Signal Processing)*, Vol. 139, Issue 2, pp. 147–159, <https://doi.org/10.1049/ip-f-2.1992.0018>.
19. Xia Y., 2008. CR-Based SAR-interferometry for landslide monitoring. *Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS-2008)*, Boston, MA, USA, 2008, ID 10445445, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2008.4779226>.
20. Xia Y., Kaufmann H., Guo X., 2002. Differential SAR interferometry using corner reflectors. *Proceedings of the IEEE International geoscience and remote sensing Symposium (IGARSS-2002)*, Toronto, Canada, 2002, Vol. 2, pp. 1243–1246, <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902>.
21. Xue F., Lv X., Dou F., Yun Y., 2020. A review of time-series interferometric SAR techniques: a tutorial for surface deformation analysis. *IEEE Geoscience Remote Sensing Magazine*, Vol. 8, Issue 1, pp. 22–42, <https://doi.org/10.1109/MGRS.2019.2956165>.
22. Zakharov A., Zakharova L., 2022. The Bureya landslide recent evolution according to spaceborne SAR interferometry data. *Remote Sensing*, Vol. 14, Issue 20, ID 5218, <https://doi.org/10.3390/rs14205218>.
23. Zhang L., Sun Q., Hu J., 2018. Potential of TCPInSAR in monitoring linear infrastructure with a small dataset of SAR images: application of the Donghai Bridge, China. *Applied Sciences*, Vol. 8, Issue 3, ID 425, <https://doi.org/10.3390/app8030425>.

Информация об авторах

ЗАХАРОВА ЛЮДМИЛА НИКОЛАЕВНА

Старший научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н., г. Фрязино, Московская область, Россия

ЗАХАРОВ АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

Главный научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н., г. Фрязино, Московская область, Россия

СИНИЛО ВИКТОР ПАВЛОВИЧ

Старший научный сотрудник Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, к.ф.-м.н., г. Фрязино, Московская область, Россия

Information about the authors

LIUDMILA N. ZAKHAROVA

PhD (Physics and Mathematics); Senior Research Scientist of the Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, Russia

ALEXANDER I. ZAKHAROV

DSc (Physics and Mathematics); Chief Research Scientist of the Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, Russia

VICTOR P. SINILO

Senior Research Scientist of the Fryazino Branch of the Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences; Fryazino, Moscow Region, Russia