УДК 528.873.044.1

## ОЦЕНКА РЕАКТИВАЦИИ ОПОЛЗНЯ НА РЕКЕ БУРЕЯ МЕТОДАМИ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

© 2022 г. Академик РАН В. Г. Бондур<sup>1,\*</sup>, Т. Н. Чимитдоржиев<sup>1,2</sup>, А. В. Дмитриев<sup>1,2</sup>, П. Н. Дагуров<sup>1,2</sup>

Поступило 15.10.2021 г. После доработки 15.10.2021 г. Принято к публикации 18.10.2021 г.

Приведены результаты исследования Бурейского оползня методом постоянных рассеивателей с использованием разновременных спутниковых радиоинтерферометрических данных, полученных за период 2019—2020 гг. На основании анализа когерентности эхо-сигналов радаров С-диапазона (Sentinel-1B) и L-диапазона (ALOS-2 PALSAR-2), зарегистрированных при различных азимутальных углах зондирования и на разных поляризациях, показано, что на большей части ложа оползня происходит временная декорреляция радиолокационных сигналов. Установлено различие в динамике деформаций для западной и восточной надводных частей оползня в реке. Выявлено хаотичное изменение поверхностной структуры, происходящее за счет камнепадов и небольших оползней, а также смещение величиной порядка 10 мм в нижней северо-восточной части ложа оползня.

*Ключевые слова:* дистанционное зондирование, космический мониторинг, радиолокационная интерферометрия, когерентность, постоянные рассеиватели, оползень

**DOI:** 10.31857/S2686739722020025

#### введение

Для предупреждения и снижения последствий опасных природных процессов и явлений перспективно использование методов космического мониторинга. Эти методы применяются, например, для выявления предвестников землетрясений путем регистрации изменений систем линеаментов на спутниковых изображениях [1] или аномалий ионосферных параметров по сигналам спутниковых навигационных систем [2, 3], путем анализа динамики блоково-разломных структур методами спутниковой радиоинтерферометрии [4] и др. Кроме того, данные дистанционного зондирования используются для мониторинга тайфунов [5], оползневых [6, 7] и других катастрофических природных процессов. При этом эффективность прогнозирования опасных геофизических явлений существенно повышается при комплексировании различных подходов, в том числе основанных, например, на применении геомеханических моделей [8, 9] или методов сейсмической

аэрокосмического мониторинга "АЭРОКОСМОС", Москва, Россия энтропии [10] с данными, полученными при космическом мониторинге.

Для решения задач мониторинга опасных природных процессов при неблагоприятных погодных условиях (наличии облачности, осадки) и при различных условиях освещенности наиболее приемлемым способом дистанционного зондирования являются спутниковые радиолокационные методы. При этом для анализа подвижек земной коры, связанных с такими природными катастрофами, как оползни, землетрясения, извержения вулканов, лавины и др. с успехом применяются методы спутниковой радиоинтерферометрии [11–16].

В настоящей работе на основании обработки разновременных данных спутниковой радарной интерферометрии с использованием метода постоянных рассеивателей исследуются процессы реактивации оползневых процессов, возникших при обрушении склона берега реки Бурея, которое произошло 11 декабря 2018 г. в Хабаровском крае на Дальнем Востоке России.

### ОСОБЕННОСТИ ИССЛЕДУЕМОГО ОБЪЕКТА. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В декабре 2018 г. в Верхнебуреинском районе Хабаровского края произошло обрушение склона

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Научно-исследовательский институт

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Институт физического материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Улан-Удэ, Россия \* mail.ushondur@gamagamag.info

<sup>\*</sup>*E*-mail: vgbondur@aerocosmos.info

сопки, на крутом левом берегу реки Бурея в 20 км выше впадения реки Тырма в водохранилище Бурейской ГЭС. На основании анализа радиолокационных изображений, полученных с борта спутника Sentinel-1, было установлено, что площадь зоны обрушения вместе с насыпью в русле реки составила величину порядка 0.4 км<sup>2</sup>, длина поверхности скольжения оползня составила около 800 м, ширина около 400 м, объем вынесенного грунта 18.5–18.9 млн м<sup>3</sup> [17]. Радиолокационные изображения, полученные с борта спутников ALOS-1 и ALOS-2, позволили наблюдать с помощью технологии радарной интерферометрии развитие оползневого процесса в период с 2006 по 2017 г. [7, 16].

Это событие создало масштабную чрезвычайную ситуацию, связанную с перекрытием телом оползня русла реки Бурея, что вызвало угрозу работе Бурейской ГЭС и опасность затопления населенных пунктов, расположенных выше по течению [17].

В январе 2019 г. для частичной расчистки русла реки начались взрывные работы. Мощность первого взрыва составляла 10 тонн тротила, мощность последующих была соизмеримой, что могло быть триггером для обвала оставшейся части сопки или для медленного смещения [17].

Случаи реактивации оползней известны [13-15]. Как показывает накопленный опыт, крупные оползневые процессы часто являются долговременными явлениями, которые можно наблюдать с использованием методов дифференциальной радиолокационной интерферометрии (ДРИ) [18]. Так, например, по данным спутниковых радиолокаторов JERS-1, ALOS-1,2 PALSAR-1,2 выполнена оценка динамики оползневых зон с 1993 по 2019 г. [15]. Подобный долговременный космический мониторинг необходим для выявления возможного повторного смещения оползня, поэтому цель данного исследования заключается в том, чтобы оценить возможные деформации в районе оползня после проведения взрывных работ, связанных с очисткой русла р. Бурея. Ранее методом дифференциальной радиолокационной интерферометрии по данным ALOS PALSAR было показано, что деформации склона на крутом левом берегу реки Бурея начались со времени поднятия уровня Бурейского водохранилища [7, 16].

В настоящей работе для оценки изменений отражательных свойств земной поверхности при реактивации этого оползневого события использовались также методы ДРИ, которые основаны на анализе изменений фазы радарных сигналов при разновременных зондированиях определенного участка земной поверхности [19, 20]. Пропорциональность фазы расстоянию до зондируемой цели позволяет выявить подвижки и деформации поверхности.

Для оценки смещений земной поверхности применялся метод постоянных рассеивателей (англ. Persistent Scatterers, PS) [19, 20] с использованием разновременных рядов измерений. Метод PS обеспечивал возможность рассчитывать динамику точечных постоянных рассеивателей, которыми являются рассеивающие объекты с достаточно сильным и устойчивым во времени радарным сигналом, обеспечивающим высокие значения когерентности. Для этих дискретных рассеивателей рассчитывалось множество интерферометрических фазовых соотношений относительно одного опорного изображения, которые позволяли оценить величину и скорость деформаций земной поверхности в районе оползня на определенных временных отрезках.

Использование временных серий радиолокационных данных для создания множества последовательных фазовых соотношений в методе PS позволяло более точно оценить деформации дискретно расположенных постоянных рассеивателей. Увеличение точности достигалось за счет использования нескольких десятков интерферограмм, что позволяло существенно уменьшить влияние атмосферы и неточностей опорной цифровой модели рельефа и орбитальные ошибки.

Исходными данными для проведения исследований являлись изображения, полученные с помощью радара с синтезированной апертурой С-диапазона, установленного на борту спутника Sentinel-1В Европейского космического агентства (EKA). Космический аппарат Sentinel-1В снимал исследуемый район на нисходящем витке № 134 солнечно-синхронной полярной орбиты с наклонением 98.2°. Радар работал в режиме правого бокового обзора, угол падения радиолокационного эхо-сигнала в районе оползня составлял 36.4°. Начало съемок исследуемого района спутником пришлось на лето 2016 г. Анализ результатов съемок показал, что еще зимой 2016-2017 гг. наблюдались вертикальные смещения почвы на береговом склоне величиной около 3.5 см за месяц в направлении вниз по склону [6].

Радарные интерферометрические измерения подвижек почвы на склоне в осенне-весенний период, а также летом оказались невозможными из-за высокой временной декорреляции эхо-сигналов этого радара, имеющего длину волны 5.6 см. В связи с этим для качественной валидации были использованы: 1) интерферометрическая когерентность по данным радара L-диапазона (длина волны 24 см) ALOS-2 PALSAR-2 [11, 15]; 2) и временной ряд радарных изображений интерферометрической когерентности, полученных со спутника Sentinel-1В на 12 дневых интервалах. Съемка радаром ALOS-2 спутника PALSAR-2 проводилась на восходящем витке орбиты с наклонением 97.9° и углом обзора 40.6°.



Рис. 1. Когерентность (а) и интерферограмма (б) в районе Бурейского оползня по данным ALOS-2 PALSAR-2.

Для анализа данных использовался модуль SARScape программы ENVI.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 представлены изображения когерентности (а) и интерферометрической фазы (б), полученные по паре изображений ALOS-2 PALSAR-2, снятых на согласованной горизонтальной поляризации 15 мая 2019 г. и 13 мая 2020 г. Анализ рис. 1а показывает, что низкие величины когерентности (менее 0.2, коричневый цвет на рис. 1а) соответствуют р. Бурея и значительной части ложа оползня (контур синего цвета). Последнее свидетельствует о существенных площад-

ДОКЛАДЫ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК. НАУКИ О ЗЕМЛЕ том 502 № 2 2022



**Рис. 2.** Карта медианных величин когерентности временного ряда Sentinel-1 в районе Бурейского оползня для бесснежного периода времени.

ных изменениях поверхностной структуры ложа оползня, что не позволяло применять классический метод ДРИ, использующий два радарных изображения, для достоверных количественных измерений возможных смещений.

На рис. 16 показана крапчатая структура изменений интерферометрической фазы по ложу оползня (контур желтого цвета), что подтверждает наличие значительных хаотичных деформаций на годичном временном интервале. Из анализа рис. 1 следует:

• Наличие небольшого оползня со смещением до 2–3 см у верхней кромки стенки срыва (с южной стороны контура ложа). Участок показан красной стрелкой на рис. 16.

• Для северо-восточной части ложа оползня характерна высокая когерентность (зеленый цвет на рис. 1а) на интервале 15 мая 2019 г.—13 мая 2020 г.

Рассмотрим пространственные изменения в районе оползня с использованием временного ряда радарных данных, полученных со спутника Sentinel-1В, для бесснежного периода времени с 3 мая 2019 г. по 12 октября 2020 г. (всего 27 радиолокационных изображений). Выбор данных для бесснежного периода обусловлен необходимостью исключить фазовые ошибки, возникающие из-за наличия снежного покрова [12].

При проведении обработки были построены карты когерентности за последовательные 12 дневные интервалы времени. По полученному временному ряду для района Бурейского оползня была построена карта медианных величин когерентности, которая приведена на рис. 2. Коричневым цветом на этом рисунке выделена область низких величин интерферометрической когерентности, а зеленым цветом обозначены участки местности с когерентностью более 0.7. Синей линией выделен контур ложа оползня по состоянию на сентябрь 2020 г. Анализ рис. 2 показал, что для северо-восточной части этого контура характерна относительная стабильность без существенных трансформаций поверхности, вся остальная площадь внутри контура имеет низкие величины когерентности, что характерно для значительных изменений поверхностной структуры. Последнее согласуется с данными когерентности ALOS-2 PALSAR-2 на годичном интервале (см. рис. 1а) и наземными наблюдениями [17].

Вдоль верхней и западной кромок стенки срыва имеются многочисленные трещины, по которым время от времени происходят небольшие оползни размером до 5 × 20 м. В июне 2020 г. на западной кромке отвесной стенки срыва, сложенной скальными породами, постоянно происходили камнепады. Расположение одного из небольших оползней вдоль верхней кромки показано красной стрелкой на рис. 16.

По этим же радарным данным, полученным со спутника Sentinel-1В методом постоянных рассеивателей, были построены временные ряды смещений вдоль линии радиолокационного обзора. В качестве опорной была использована цифровая модель рельефа (ЦМР), полученная по радиолокационным бистатическим изображениям TerraSAR-X/TanDEM-X за 28 сентября 2020 г.

В качестве так называемого супермастера было использовано изображение за 19 августа 2019 г.



Рис. 3. Расположение постоянных рассеивателей PS (а) и временные ряды смещений PS вдоль линии радиолокационного обзора (б).

Пороговое значение когерентности для выбора постоянных рассеивателей составляло – 0.75.

На рис. За показано пространственное распределение постоянных рассеивателей, которые были сегментированы на 4 кластера: 1 – PS на противоположном от ложа оползня берегу (синий цвет), 2 – PS восточной (черный) и 3 – PS западной (желтый) части тела оползня в р. Бурея, а также 4 – PS, расположенные в ложе оползня (красный цвет). Для каждой группы PS представлены усредненные временные ряды смещений вдоль линии радиолокационного обзора (рис. 36).

Анализ рис. 3 показывает, что, несмотря на пространственную близость 2-го и 3-го сегментов

(черный и желтый цвета) в реке Бурея, для них характерны различные смещения. Отрицательный тренд восточной части оползня (сегмент 2, черный цвет) начинается во второй половине лета 2019 г. В этот же период времени западная часть (сегмент 3, желтый цвет) стабилизировалась после первоначального смещения на 4 мм. Разность смещений в 2–3 мм в 2019 г. достигла 7–8 мм в 2020 г. Различная скорость оседания PS западной и восточной частей оползня связана, вероятно, с различием структуры тела оползня – твердые или рыхлые породы – которые со временем проседали. Данная гипотеза согласуется с результатами работы [17], где отмечаются два основных этапа

обрушения оползня: в северо-северо-восточном направлении (PS черного цвета) и в северо-северо-западном направлении (PS желтого цвета). Первичный оползень представлял собой единое целое, который без нарушения структуры сместился в воду. Вторичный оползень первоначально также был единой структурой, а затем произошло его запрокидывание и дробление [17].

Смещения PS по ложу оползня (красный цвет) со скоростями порядка 1 см/год соответствуют нижнему северо-восточному фрагменту контура с когерентностью более 0.7 (зеленый цвет в рамках контура оползня на рис. 1а, 2). Подобный эффект возможен в случае скольжения PS с сохранением поверхностной структуры, формирующей постоянные рассеиватели. Указанный фрагмент контура имеет уклон от радара и в сторону реки (в данном случае измерялась компонента скорости смещения от радара к центру ложа оползня). Вместе с тем, судя по изображениям когерентности на рис. 1а, 2, поверхностная структура этого северо-восточного фрагмента ложа оползня более стабильна по сравнению с другими участками с низкой когерентностью (коричневый цвет).

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании данных спутниковой радиолокационной интерферометрии с использованием метода постоянных рассеивателей для анализа процесса реактивации оползневой зоны на р. Бурея установлено:

• Различие деформаций для западной и восточной надводных частей оползня в реке.

• Наличие фрагмента в нижней северо-восточной части ложа оползня со смещением вдоль линии радиолокационного обзора на величину порядка 1 см за период с 3 мая 2019 г. по 12 октября 2020 г. Летом 2019 г. отмечалась относительная стабильность, а в бесснежный период 2020 г. скорость смещений увеличилась.

Анализ данных когерентности на годичном интервале в L-диапазоне и медианных величин временного ряда когерентности в C-диапазоне (бесснежный период 2019—2020 гг.), полученных при различной геометрии радиолокационного обзора и на различных поляризациях, указывает на временную декорреляцию радиолокационного эхо-сигнала от значительной части ложа оползня. Это позволяет утверждать о существенных изменениях поверхностной структуры ложа оползня в виде камнепадов и смещений, что согласуется с данными наземных наблюдений [17].

#### БЛАГОДАРНОСТИ

Данные спутниковой радиолокационной интерферометрической системы TerraSAR-X/TanDEM-X

предоставлены немецким аэрокосмическим центром DLR в рамках проекта XTI\_HYDR0485. Изображения ALOS-2 PALSAR-2 предоставлены японским аэрокосмическим агентством (JAXA) в рамках проекта ALOS-2 RA6 (PI-3402).

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-2020-776.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Бондур В.Г., Зверев А.Т. Метод прогнозирования землетрясений на основе линеаментного анализа космических изображений // ДАН. 2005. Т. 402. № 1. С. 98–105.
- 2. Бондур В.Г., Смирнов В.М. Метод мониторинга сейсмоопасных территорий по ионосферным вариациям, регистрируемым спутниковыми навигационными системами // ДАН. 2005. Т. 402. № 5. С. 675–679.
- 3. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохбере 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 // ДАН. 2007. Т. 414. № 4. С. 540–543.
- 4. Бондур В.Г., Чимитдоржиев Т.Н., Тубанов Ц.А., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Анализ динамики блоково-разломной структуры в районе землетрясений 2008 и 2020 г. на Южном Байкале методами спутниковой радиоинтерферометрии // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 144–150. https://doi.org/10.31857/S268673972108003X
- 5. Бондур В.Г., Пулинец С.А., Ким Г.А. О роли вариаций галактических космических лучей в тропическом циклогенезе на примере урагана Катрина // ДАН. 2008. Т. 422. № 2. С. 244–249.
- 6. Захарова Л. Н., Захаров А. И., Митник Л. М. Первые результаты радиолокационного мониторинга последствий оползня на реке Бурея по данным Sentinel-1 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 69–74.
- 7. 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 Бурея // Исследование Земли из космоса. 2019. № 4. С. 3–17.

https://doi.org/10.31857/S0205-9614201943-17

- Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохбере М.Б., Лапшин В.М., Нечаев Ю.В. Связь между вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры и сейсмической активностью на примере Южной Калифорнии // ДАН. 2010. Т. 430. № 3. С. 400–404.
- 9. Бондур В.Г., Гарагаш И.А., Гохберг М.Б., Родкин М.В. Эволюция напряженного состояния Южной Ка-

лифорнии на основе геомеханической модели и текущей сейсмичности // Физика Земли. 2016. № 1. С. 120–132. https://doi.org/10.7868/S000233371601004X

- 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. https://doi.org/10.7868/S0002333717010021
- Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Мониторинг оползневых процессов с помощью космических интерферометрических радаров L-диапазона на примере обрушения склона берега реки Бурея // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 3–14.

https://doi.org/10.31857/S0205-9614201953-14

- Dagurov P.N., Chimitdorzhiev T.N., Dmitriev A.V., Dobrynin S.I. Estimation of Snow Water Equivalent from L-band Radar Interferometry: Simulation and Experiment // Int. J. Remote Sensing. 2020. T. 41. № 24. C. 9328–9359.
- Squarzoni G., Bayer B., Franceschini S., Simoni A. Preand Post-failure Dynamics of Landslides in the Northern Apennines Revealed by Space-borne Synthetic Aperture Radar Interferometry (InSAR) // Geomorphology. V. 369. 15 November 2020. 107353. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107353
- 14. *Ciuffi P., Bayer B., Berti M., Franceschini S., Simoni A.* Deformation Detection in Cyclic Landslides Prior to Their Reactivation Using Two-Pass Satellite Interfer-

ometry. // Appl. Sci. 2021. 11. 3156. https://doi.org/10.3390/app11073156

- Takada Y., Motono G. Spatiotemporal Behavior of a Large-scale Landslide at Mt. Onnebetsu-dake, Japan, Detected by Three L-band SAR Satellites. // Earth Planets Space. 2020. 72. 131. https://doi.org/10.1186/s40623-020-01265-4
- 16. Бондур В.Г., Захарова Л.Н., Захаров А.И., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В., Дагуров П.Н. Долговременный мониторинг оползневого процесса на берегу реки Бурея по данным интерферометрической съемки радаров L-диапазона // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 113–119. https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-113-11
- 17. *Махинов А.Н.* Крупный оползень и вызванное им цунами в Бурейском водохранилище. // Геоморфология. 2020. № 3. С. 31–43.
- Rosen P.A., Hensley S., Joughin I.R., Li F.K., Madsen S.N., Rodriguez E., Goldstein R.M. Synthetic Aperture Radar Interferometry // Proc. IEEE. 2000. V. 88. № 3. P. 333–382.
- 19. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.* Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. № 1. P. 8–20. https://doi.org/10.1109/36.898661
- 20. Pepe A., Calo F.A. Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements // Appl. Sci. 2017. V. 7. № 12. P. 1264. https://doi.org/10.3390/app7121264

# ESTIMATION OF LANDSLIDE REACTIVATION ON THE BUREYA RIVER WITH PS INTERFEROMETRY

## Academician of the RAS V. G. Bondur<sup>*a*,#</sup>, T. N. Chimitdorzhiev<sup>*a*,*b*</sup>, A. V. Dmitriev<sup>*a*,*b*</sup>, and P. N. Dagurov<sup>*a*,*b*</sup>

<sup>a</sup> AEROCOSMOS Research Institute for Aerospace Monitoring, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup> Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude, Russian Federation

*<sup>#</sup>E-mail: vgbondur@aerocosmos.info* 

Here we present the results from the Bureya landslide study by the method of persistent scatterers using multi-temporal radio interferometric data for the years of 2019–2020. The analysis of coherence of Sentinel-1B C-band and ALOS-2 PALSAR-2 L-band radar echo signals registered at various azimuth sensing angles and various polarizations have shown that temporal decorrelation of radar signals takes place over most of the landslide bed. The difference in the dynamics of deformations for the western and eastern above-water parts of the landslide in the river has been found. A chaotic change in the surface structure due to rockfalls and small landslides has been revealed, as well as a displacement of about 10 mm in the lower northeastern part of the landslide bed.

*Keywords:* remote sensing, satellite monitoring, radar interferometry, coherence, persistent scatterers, land-slide