

ВОЗМОЖНОСТИ ФАЗОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРИМЕРЕ БУРЕЙСКОГО ОПОЛЗНЯ

Захаров А.И., Захарова Л.Н.

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, <http://fire.relarn.ru>
Фрязино 141190, Московская область, Российская Федерация

Поступила 19.03.2019, принята 17.04.2019

Представлена членом-корреспондентом РАЕН Р.П. Быстровым

Приведены результаты обработки данных европейского космического радара с синтезированной апертурой Sentinel-1 по району оползня на реке Бурее методами дифференциальной интерферометрии с целью выявления и оценки последствий катастрофического схода оползня в декабре 2018 года. В обработке использовано более 20 сеансов съемки, выполненных с условных трасс 134 и 61 в период с декабря 2018 года по март 2019 в условиях высокой временной стабильности сигналов, отраженных поверхностью оползневого склона. Анализ фазовых измерений на интерферограммах с малыми пространственными базами и на дифференциальных интерферограммах позволил сделать заключение о стабильности поверхности цирка оползня в течение всего периода времени, покрытого съемками. Не выявлено каких-либо заметных (более нескольких миллиметров) мелкомасштабных смещений поверхности оползня в конце января 2019 года вследствие взрывных работ в перемычке русла реки. Сделаны также оценки масштабов оползня. Оказалось, что объем сошедшего со склона сопки грунта составил не менее 18.5 млн. м³, максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно цифровой модели рельефа SRTM после схода оползня достигло 140-150 м, площадь оползня в вертикальной проекции равна 22.8 га. Сделано заключение об эффективности применения данных радаров С-диапазона для контроля стабильности оползневых склонов, покрытых растительностью, методами радарной интерферометрии и высокой точности измерений возможных мелкомасштабных сдвигов поверхности при условии проведения радарных наблюдений в зимний период времени.

Ключевые слова: оползень, радиолокаторы с синтезированной апертурой, радиолокационная интерферометрия, измерение подвижек поверхности, цифровая модель рельефа

УДК 621.396.96

СОДЕРЖАНИЕ

1. ВВЕДЕНИЕ (31)
 2. ОСНОВЫ МЕТОДА (32)
 3. ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА (34)
 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ОБСУЖДЕНИЕ (34)
 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ (37)
- ЛИТЕРАТУРА (37)

1. ВВЕДЕНИЕ

Катастрофический оползень на реке Бурее в декабре 2018 года перекрыл ее русло, создав угрозу затопления близлежащих населенных пунктов, а также разрушения объектов жилой и промышленной инфраструктуры,

расположенных у реки ниже по течению, из-за прогнозируемого на весну прорыва естественной плотины. Судя по данным многоспектрального датчика на японском геостационарном спутнике Himawari-8, оползень сошел 11 декабря 2018 г. [1, 2]. Первые представления о масштабах катастрофического природного явления были получены с помощью оптического снимка со спутника Sentinel-2 от 12 декабря, на котором отчетливо видны изменения ландшафта: расположение и геометрические размеры оползня. Проведенные в январе 2019 г. наземные измерения показали, что длина оползня составляет 800 м, объем сошедшего грунта был

оценен приблизительно величиной 24 млн. кубометров. Для восстановления в реке водотока в слое оползневых скальных пород в период с 22 января по 1 февраля военными специалистами была проведена серия взрывов, сформировавших протоку, которая обеспечила снижение уровня воды в реке выше запруды. Всепогодные методы радиолокационного наблюдения поверхности, включая методы радиолокационной интерферометрии, позволяют существенно расширить представления о масштабах и динамике развития подобных природных явлений.

Радиолокационная интерферометрия как способ мониторинга оползневых процессов широко применяется с конца прошлого века благодаря появлению широкодоступных данных зарубежных космических радаров с синтезированной апертурой (РСА) X -, C -, L -диапазонов волн [3]. Многочисленные примеры применения этого метода показывают возможность обнаружения и измерения мелкомасштабных смещений отражающей поверхности тела оползня с точностью в несколько миллиметров, оценки его площади, долговременной эволюции оползневого процесса [4-7]. Проблемы потери когерентности отраженных сигналов вследствие меняющихся условий отражения в сравнительно коротковолновых диапазонах волн РСА, в том числе в областях с развитым растительным покровом, стимулировали развитие классических методов дифференциальной радарной интерферометрии, результатом которого стало создание метода постоянных отражателей [8-11], вариантов развития этого метода STAMPS [12], SQUEESAR [13], метода малых базовых линий (Small BAseline, SBAS) [14], и др. Существенными требованиями метода постоянных отражателей и аналогичных ему является необходимость использования длинных рядов наблюдений и применение методов статистического анализа для выявления надежных отражателей. В данной работе в силу ограниченного набора доступных радиолокационных снимков территории оползня будет применяться классический метод дифференциальной радарной интерферометрии.

2. ОСНОВЫ МЕТОДА

В основе метода радарной интерферометрии лежит использование информации о разности фаз эхо-сигналов, зарегистрированных радиолокационной системой от выбранного участка местности с двух близких точек в пространстве, для которых выполняется условие взаимной когерентности принимаемых эхо-сигналов. При этом разность фаз принятых сигналов зависит от разности расстояний до цели и несет информацию о рельефе поверхности, а в двухпроходном варианте еще и об изменении расстояний до цели за время между съемками [15, 16].

Иллюстрация геометрии съемки рельефа приведена на **рис. 1**. Перепады рельефа, высота орбит спутников, а также расстояние между ними для наглядности выполнены не в масштабе, опорная поверхность геоида на участке съёмки приближена плоскостью. Точка A_1 – первая точка съемки, A_2 – вторая точка съемки, которая может находиться, например, на другой траектории этого же аппарата, выполненной спустя некоторое время. Обозначим через H высоту аппарата над поверхностью в первой точке съемки. Расстояние между точками съемки d_1 является базой интерферометра, которая ориентирована под углом α_1 к горизонту. Сигнал радара из точки A_1 приходит в точку поверхности P , находящуюся на расстоянии r_1 под углом α к надирному направлению и местной вертикали.

Интерферограмма – это разность фаз сигналов $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, полученная в результате поэлементного комплексного перемножения сигналов U_1 и U_2^* , принятых в точках пространства A_1 и A_2 от одного и того же элемента поверхности:

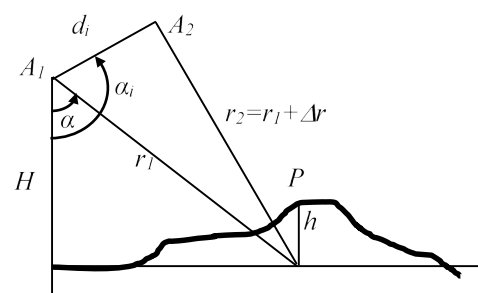


Рис. 1. Геометрия интерферометрической съемки рельефа поверхности.

$$U_1 U_2^* = u_1 u_2 \exp(j(\phi_1 - \phi_2)) = u_1 u_2 \exp\left(\frac{-j4\pi\Delta r}{\lambda}\right),$$

где u_1 и u_2 – амплитуды сигналов, Δr – разность расстояний от точек съемки до выбранного элемента поверхности, λ – длина волны.

Разность фаз $\Delta\varphi$ на интерферограмме, сформированной в результате совместной обработки пары радиолокационных снимков, содержит в первом приближении информацию о рельефе (так называемая топографическая фаза $\Delta\varphi_t$), мелкомасштабной динамике (смещениях) отражающей поверхности $\Delta\varphi_d$, флуктуациях фазы на трассе распространения сигнала $\Delta\varphi_p$, тепловых шумах аппаратуры и шумах обработки $\Delta\varphi_N$ и др. Ограничившись первыми двумя составляющими, запишем [15, 16]:

$$\Delta\varphi_{12} = \Delta\varphi_t + \Delta\varphi_d = -\frac{4\pi d_p \Delta h}{\lambda r \sin \alpha} - \frac{4\pi \delta r_d}{\lambda}, \quad (1)$$

где перпендикулярная компонента интерферометрической базы равна

$$d_p = d_i \sin(\alpha_1 - \alpha).$$

Отметим, что чувствительность интерферометрической разности фаз к вариациям высот рельефа Δh растет с увеличением базы d_p , с уменьшением длины волны 0.5λ , угла обзора α и наклонной дальности до поверхности r . Для радара Sentinel-1 длина волны $\lambda = 5.6$ см, наклонная дальность от радара до поверхности оползня составляет 820 км. Мелкомасштабное смещение поверхности за время между съемками не отмечено на рисунке в силу его незначительных размеров по сравнению с масштабами геометрии съемки. Вследствие этого смещения, например, на величину $\delta r_d = 0.5\lambda$ в (1) разность фаз на интерферограмме изменится на 2π . Важным числовым показателем чувствительности $\Delta\varphi_t$ к рельефу является высота неоднозначности h_a : такой перепад высоты рельефа между двумя точками на местности, при котором значения разности фаз на интерферограмме в соответствующих элементах изображения отличаются на 2π :

$$h_a = \lambda r (2d_p)^{-1} \sin \alpha.$$

Для правильной интерпретации фазовой информации на интерферограмме необходимо учитывать, что при положительном значении d_p , согласно (1), с ростом истинной высоты

поверхности относительно использованной в обработке цифровой модели рельефа разность фаз на интерферограмме уменьшается. При отрицательном значении d_p она растет. Влияние мелкомасштабного радиального смещения поверхности за время между съемками таково, что при просадке поверхности в более поздней съемке, согласно (1), разность фаз увеличивается. Необходимо отметить невозможность одновременных измерений рельефа и мелкомасштабных радиальных смещений поверхности за время между съемками. При решении задачи анализа динамики подстилающей поверхности выходом является использование цифровой модели рельефа (ЦМР) для компенсации влияния рельефа, либо выбор пары снимков с очень малой базой d_p , когда первой компонентой в (1) можно пренебречь.

Относительная точность измерений высот в пределах кадра съемки определяется когерентностью отраженных сигналов в точках съемки A_1 и A_2 на рис. 1. Степень когерентности эхо-сигналов двух комплексных радарных изображений U_1 и U_2 может быть измерена непосредственно по данным радиолокационной съемки, она определяется следующим выражением:

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

где $E\{\bullet\}$ – операция взятия математического ожидания по некоторому пространственному ансамблю отсчетов с центром в текущем элементе изображения.

К основным факторам, влияющим на уровень γ , можно отнести в первую очередь декорреляцию γ_N , вызванную тепловыми шумами измерительной системы, пространственную декорреляцию γ_{sp} отраженных сигналов, возникшую из-за изменения условий приема в различных точках пространства, временную декорреляцию условий отражения сигналов γ_{td} из-за разнесения измерений по времени и объемную декорреляцию при съемке слоистых покровов с объемным рассеянием γ_v . Ограничившись упомянутыми эффектами и предположив их независимость, запишем

$$\gamma = \gamma_N \gamma_{sp} \gamma_{td} \gamma_v. \quad (3)$$

Интерферометрическая когерентность характеризует ошибки измерений разности фаз и, соответственно, относительную, межпиксельную точность измерения высот поверхности и подвижек подстилающей поверхности [15, 16].

3. ДАННЫЕ ДЛЯ АНАЛИЗА

В работе использованы данные европейского радара с синтезированной апертурой Sentinel 1, проводившего съемку в режиме IW (Interferometric Wide mode). Стандартная ширина кадра в этом режиме, состоящего из 3 парциальных полос, равна 240 км. Зона оползня попадает в пределы кадра Sentinel-1 при наблюдении с условных трасс 61 и 134. На первой трассе угол падения волны сигнала на поверхность равен 32° (парциальная полоса №1 режима SCANSAR Sentinel-1), на второй — 42° (третья парциальная полоса). Период повторения съемок равен 12 дням, так что с момента схода оползня в начале декабря прошлого года до середины марта 2019 года по данной территории на каждой из трасс проведено не менее 10 сеансов съемки, пригодных для интерферометрической обработки. В **таблицах 1 и 2** приведены даты съемки для сформированных пар сеансов съемки, размеры перпендикулярной компоненты интерферометрической базы и высот неоднозначности. Основными комбинациями снимков были пары снимков, полученные с интервалом 12 дней. Обработка комбинаций снимков с большим интервалом между съемками показала, что это ведет к резкому снижению когерентности отраженных сигналов из-за временной декорреляции γ_{td} (см. формулу (3)) и, как следствие, потере информативности фазовых измерений.

Таблица 1.

Параметры интерферометрической съемки Sentinel-1 с условной трассы 134.

№ пары	Даты съемки, ггггммдд	$d_p, м$	$h_a, м$
1	20181128-20181210	61	251
2	20181210-20181222	83	185
3	20181222-20190103	-69	221
4	20190103-20190115	-90	170
5	20190115-20190127	40	381
6	20190127-20190208	50	308
7	20190208-20190220	39	395
8	20190220-20190304	-12	1304

Таблица 2.

Параметры интерферометрической съемки Sentinel-1 с условной трассы 61.

№ пары	Даты съемки, ггггммдд	$d_p, м$	$h_a, м$
1	20181123-20181205	34	520
2	20181205-20181217	-151	118
3	20181217-20181229	8	2222
4	20181229-20190110	51	351
5	20190110-20190122	16	1096
6	20190122-20190203	81	220
7	20190203-20190215	-149	120
8	20190215-20190227	9	1957
9	20190227-20190311	-30	594

В работе использованы данные формата SLC (Single Look Complex). Расстояние между пикселями изображения по наклонной дальности в этом формате 2.3 м, между строками 14.1 м. В ходе интерферометрической обработки для снижения уровня шумов применено усреднение данных (4 пикселя) по дальности. При таком усреднении размеры пикселей изображения по азимуту и наземной дальности оказываются примерно одинаковыми.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ И ОБСУЖДЕНИЕ

Интерферометрическая когерентность – важный фактор, определяющий уровень шумов на интерферограмме, точность измерений рельефа и подвижек подстилающей поверхности. На качество интерферометрических измерений радаров С-диапазона существенное влияние оказывает временная декорреляция отраженных сигналов. Чем меньше интервал между съемками и объем биомассы растительности в зоне съемки, тем выше когерентность. Также имеет значение сезон, в который проводятся измерения: в зимнее время когерентность, как правило, возрастает вследствие большей стабильности условий отражения сигнала замерзшей почвой и растительностью. График изменения уровня когерентности отражений на поверхности оползня для пар сеансов из табл. 1 приведен на **рис. 2**.

Первый отсчет графика с низким уровнем γ объясняется высокой изменчивостью условий отражения сигнала незамерзшими подстилающими покровами. Следующий, еще более низкий уровень когерентности для пары 20181210-20181222, объясняется полностью

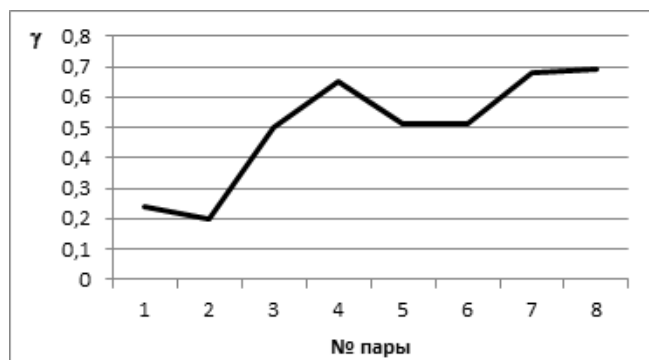


Рис. 2. Когерентность отраженных оползнем сигналов для пар сеансов из таблицы 1.

изменившимся микрорельефом поверхности оползня после схода грунта. Начиная с третьей пары (после 22.12.2018) промерзшая почва и растительность в зоне съемки становятся весьма стабильной отражающей средой, что позволяет оценить и модифицированную форму рельефа в зоне оползня, и судить о последующих мелкомасштабных подвижках грунта в случае их возникновения.

Характерной для района оползня деталью на интерферограмме при условии больших значений d_p и, следовательно, хорошей чувствительности измерений фазы к рельефу являются хорошо различимые овальные структуры на рис. 3b (пара сеансов с положительной проекцией базы d_p) и 3c (пара сеансов с отрицательной d_p).

Рельеф в месте оползневого цирка не соответствует цифровой модели: на склоне сопки возникло углубление. Из-за недооцененного таким образом рельефа в первом случае фаза растет от краев цирка к его условному центру (яркость фазового изображения в соответствии с принятой кодировкой увеличивается, рис. 3b). Во втором случае, поскольку база интерферометра имеет противоположный

знак, разность фаз уменьшается, яркость падает. Подобная картина справедлива для всех пар сеансов из таблиц 1 и 2 вплоть до середины марта 2019 года, за исключением пар сеансов с малыми интерферометрическими базами, что позволяет сделать предположение о доминировании рельефа в эти интервалы времени, поскольку просадки поверхности, идущие в одном направлении относительно радара, приводят к монотонному росту разности фаз, согласно (1).

Следует также отметить, что на обеих интерферограммах рис. 3 линия скачка фазы на 2π , четко прослеживаемая в правой части овального цирка, отсутствует в его левой части. Это связано с эффектом искажения радиолокационных изображений: при боковой съемке происходит сжатие обращенных к антенне склонов. На рис. 3 радиолокатор излучает сигнал справа. Таким образом, дальний от антенны край оползневого цирка сжимается на амплитудном изображении в яркую узкую полосу (рис. 3a), а на интерферограмме не представляется возможным отследить ход фазы; усреднение в количестве 4 пикселей по дальности, упомянутое ранее, а также фильтрация интерферограммы приводят к окончательному виду разомкнутого кольца, показанного на рис. 3b и 3c.

При решении задачи выявления динамики рельефа за время между съемками одним из методов снижения влияния нескомпенсированного рельефа на интерферограмму является аккуратный подбор базы интерферометра: рассмотрение пар снимков только с малыми базами, что позволяет пренебречь компонентой $\Delta\varphi_i$ в (1). В

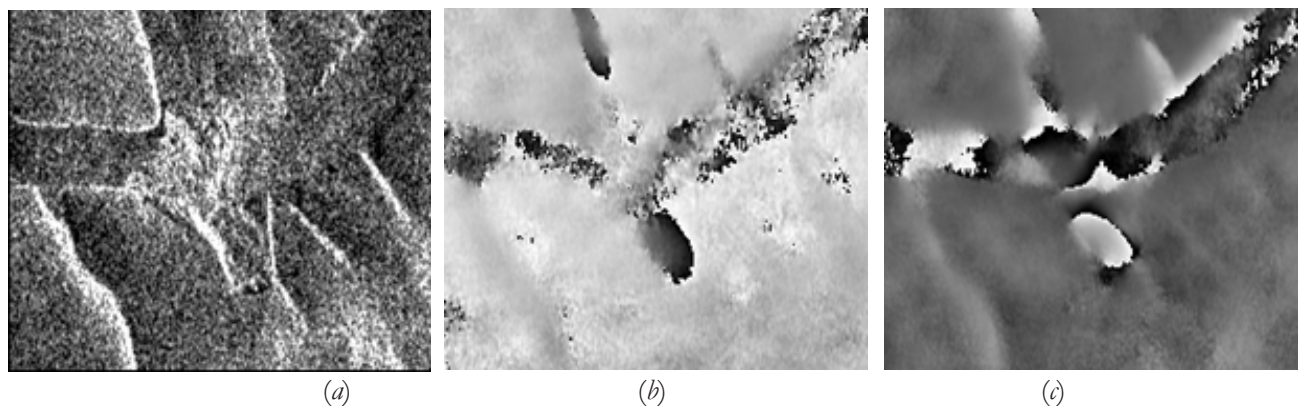


Рис. 3. Амплитудное изображение (a), интерферограмма с положительной d_p (b) и интерферограмма с отрицательной d_p (c).

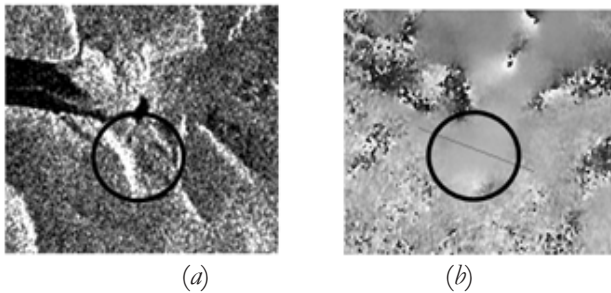


Рис. 4. Амплитудное изображение (а) и интерферограмма (b) для пары сеансов с малой базой.

нашем случае это пара 8 табл. 1 и пары 3, 5, 8 табл. 2. При малой, порядка 15 м, длине базы и соответствующей ей высоте неоднозначности около 1000 м (см., например, пару 5 табл. 2), ошибка в высоте рельефа $\Delta h = 100$ м в (1) будет приводить к такому же изменению фазы на интерферограмме, которое возникает при мелкомасштабном радиальном смещении поверхности на $\lambda/20$, или всего 2.8 мм.

Характерная для таких пар интерферограмма (пара сеансов 15-27 февраля 2019 г.) приведена на рис. 4.

На профиле разности фаз рис. 5, пересекающем оползень в поперечном направлении (положение линии профиля указано на рис. 4b), никаких заметных изменений фазы, кроме незначительных колебаний в пределах 0.5 радиан, нет. Соответствующее этому изменению фазы возможное смещение поверхности не превышает 2 мм. Подобные результаты получены при использовании пар снимков 17–29 декабря 2018 г. (база 8 м) и 10-22 декабря 2019 г. (база 16 м), что позволяет утверждать, что после схода оползня отсутствовала какая-либо мелкомасштабная динамика поверхности в конце декабря, середине января и конце февраля.

Период активных взрывных работ с 22 января по 1 февраля 2019 года покрыт парами снимков со сравнительно большими базами

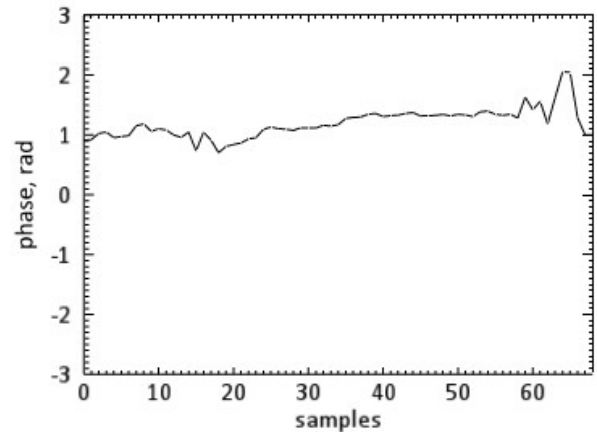


Рис. 5. Значения разности фаз вдоль профиля на рис. 4b интерферометра, а потому для выделения возможной динамики фазы на интерферограммах пар 5 и 6 из таблицы 1, а также пары 6 из таблицы 2 была вычтена фаза $\Delta\varphi_r$. Эта компонента была оценена по данным пар сеансов, снятых в условиях заведомо стабильной поверхности оползня.

На рис. 6 приведен пример вычитания топографической фазы пары сеансов 20190208-20190220 из пары 20190115-20190127. Судя по результирующей фазе (рис 6c), каких-либо проявлений мелкомасштабной динамики поверхности оползня в период взрывных работ в конце января нет. Аналогичные результаты были получены и для пар 20190122-20190203, 20190127-20190208.

Для оценки объема вынесенного оползнем грунта возьмем пару №4 из табл. 1, охватывающую период с 3 по 15 января 2019 г., до начала активных взрывных работ. Поскольку при построении интерферограммы для коррекции топографической фазы использована цифровая модель рельефа SRTM, построенная задолго до оползня, рельеф, модифицированный в этом месте в результате схода оползня, четко проявляется на интерферограмме (рис. 3d).

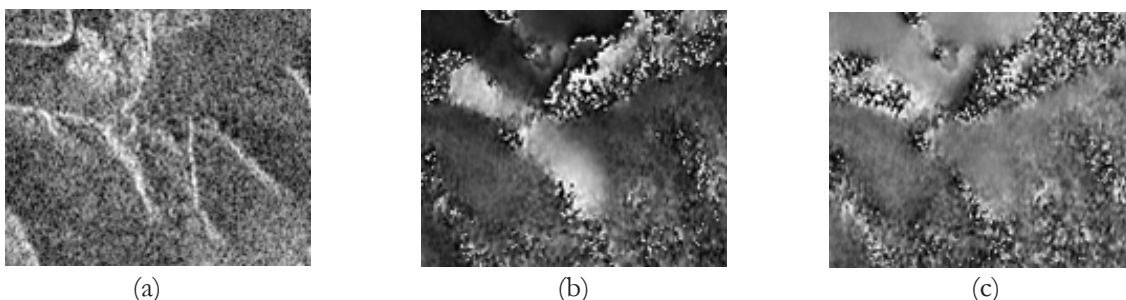


Рис. 6. Амплитудное изображение (а), интерферограмма до коррекции топографической фазы (b) и скорректированная интерферограмма (c).

Место оползня на интерферограмме заметно здесь благодаря светлому овалному пятну в нижней части рисунка. Интегрирование разности фаз в пределах оползня позволило оценить объем вынесенной массы скального грунта. По нашим оценкам, с учетом высоты неоднозначности 119 м для использованной интерферометрической пары и площади пиксела на интерферограмме 187 м², объем вынесенного оползнем грунта составил 18.5 млн. м³. Максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно модели рельефа SRTM после схода оползня достигает 140-150 м, площадь оползня в вертикальной проекции равна 22.8 га.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы радарной интерферометрии являются эффективным инструментом для измерения параметров рельефа земной поверхности и выявления мелкомасштабной динамики подстилающих покровов. Оценены масштабы оползневых явлений и объем скального грунта, вынесенного с оползневого склона на реке Бурья. Оказалось, что объем вынесенного оползнем грунта в декабре 2018 года составил 18.5 млн. м³, площадь оползня в вертикальной проекции равна 22.8 га. Максимальное вертикальное смещение отражающей поверхности относительно модели рельефа SRTM после схода оползня достигает 150 м. Несмотря на невысокое в целом качество классических интерферометрических измерений радарными такого сравнительно коротковолнового диапазона, как на борту Sentinel-1, особенно по территориям с развитыми растительными покровами, оказалось возможным применить методы классической радарной интерферометрии благодаря наличию снимков, сделанных в холодное время года, что обеспечило высокую временную когерентность отраженных сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ДЦ ФГБУ НИЦ "ПЛАНЕТА". *Космический мониторинг ситуации на реке Бурья 2018-12-24*. https://www.dvrcpod.ru/News.php?id_new=2821.
2. Крамарева ЛС, Лупян ЕА, Амельченко ЮА, Бурцев МА, Крашенинникова ЮС, Суханова ВВ, Шапилова ЮА. Наблюдение зоны обрушения сопки в районе реки Бурья 11 декабря 2018 года. *Совр. пробл. дистанционного зондирования Земли из космоса*, 2018, 15(7):266-271.
3. Colesanti C, Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 2006, 88:173-199.
4. Fruneau B, Achache J, Delacourt C. Observation and Modeling of the Saint-Etienne-de-Tinée Landslide Using SAR Interferometry. *Tectonophysics*, 1996, 265:181-190.
5. Rott H, Scheuchl B, Siegel A, Grasemann B. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: a case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps, Austria. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, 26:1629-1632.
6. Rott H, Mayer C, Siegel A. On the operational potential of SAR interferometry for monitoring mass movements in Alpine areas. *Proc. of the 3rd European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR 2000)*, Munich, Germany, 2000.
7. Kimura H, Yamaguchi Y. Detection of landslide areas using satellite radar interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2000, 66:337-344.
8. Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *Proc. of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 1999)*, Hamburg (Germany), 28 June–2 July 1999, vol. 3, pp. 1528-1530.
9. Ferretti A, Prati C, Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using Permanent Scatterers in Differential SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2000, 38 (5):2202-2212.
10. Colesanti C, Ferretti A, Prati C, Rocca F. Monitoring landslides and tectonic motion with the Permanent Scatterers technique. *Engineering Geology*, 2003, 68:3-14.
11. Colesanti C, Ferretti A, Novali F, Prati C, Rocca F. SAR monitoring of progressive and seasonal ground deformation using the Permanent Scatterers technique. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, 41:1685-1700.
12. Ferretti A, Fumagalli A, Novali F, Prati C, Rocca F, Rucci A. A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, 49(9):3460-3470.
13. Hooper A, Zebker H, Segall P, Kampes B. A new

- method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(23).
14. Berardino P, Fornaro G, Lanari R, and Sansosti E. A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, 40(11):2375–2383.
15. Rosen PA, Hensley S, Joughin IR, Li FK, Madsen SN, Rodriguez E, and Goldstein RM. Synthetic aperture radar interferometry. *Proc. IEEE*, 2000, 88(3):333-392.
16. Захаров А.И., Яковлев О.И., Смирнов В.М. *Спутниковый мониторинг Земли: Радиолокационное зондирование поверхности*. М., URSS, 2015, 248 с.

Захаров Александр Иванович

д.ф.-м.н., с.н.с.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
aizakhar@ire.rssi.ru

Захарова Людмила Николаевна

к.ф.-м.н., с.н.с.

Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал
Фрязино 141190, Моск. обл., Россия
zakharova@ire.rssi.ru

POTENTIAL OF PHASE MEASUREMENTS IN RADAR INTERFEROMETRY FOR THE OBSERVATION OF EMERGENCY SITUATIONS BUREYA LANDSLIDE CASE

Alexander I. Zakharov, Liudmila N. Zakharova

Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS, Fryazino branch, <http://fire.relarn.ru>
Fryazino 141190, Moscow Region, Russian Federation
aizakhar@ire.rssi.ru, zakharova@ire.rssi.ru

Abstract. The results of the European spaceborne Sentinel-1 synthetic aperture radar differential interferometry data processing for the Bureya landslide area aimed at detection and assessment the consequences of catastrophic event in December 2018 are presented. More than 20 scenes, obtained in SAR observations from relative orbits 134 and 61 for the period from December 2018 to March 2019 provided high temporal stability of signal backscatter from landslide slopes, were used. Analysis of phase measurements on interferograms with small spatial baselines and on differential interferograms (in the case of a large baseline) allows us reach the conclusion about temporal stability of the surface of the landslide circus during the entire period covered by the Sentinel-1 SAR observations. No noticeable (more than a few millimeters) small-scale displacements of the slopes in the end of January 2019 due to blasting operations in the riverbed cofferdam were revealed. We estimated landslide scales also. The volume of the ground that slid down the slope was not less than 18.5 million m³, the maximal vertical displacement of the scattering surface after the landslide compared with SRTM digital elevation model reached 140-150 m, the landslide area in the vertical projection is 22.8 ha. Thus, Sentinel-1 radar data demonstrated the its potential to monitor the stability of landslide slopes by means of radar interferometry technique and high-accuracy of the measurements of probable small-scale surface displacements provided the conduction of the radar observations in the winter time period.

Keywords: landslide, synthetic aperture radar (SAR), SAR interferometry, surface displacement measurement, digital elevation model

UDC 621.396.96

Bibliography – 16 references

RENSIT, 2019, 11(1):31-38

Received 19.03.2019, accepted 17.04.2019

DOI: 10.17725/rensit.2019.11.031