## Обобщение опыта применения различных методов обработки РСА снимков для изучения и мониторинга оползневой активности склонов в районе Большого Сочи

# В.О. Михайлов, Е.А. Киселева, Е.И. Смольянинова, В.И. Голубев, П.Н. Дмитриев, Е.П. Тимошкина, С.А. Хайретдинов

## Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва, 123242, Россия E-mail: mikh@ifz.ru

В работе рассмотрены ключевые вопросы обработки и интерпретации данных радарной спутниковой интерферометрии на примере мониторинга оползневых склонов в районе г. Большой Сочи по снимкам с января 2007 г. по сентябрь 2012 г., выполненным спутниками ALOS-1 PALSAR-1, ENVISAT и TerraSAR-X. Комплексирование различных методов обработки радарных снимков и использование снимков различных диапазонов длин волн позволило успешно изучать оползневые процессы и осуществлять мониторинг их активности даже в сложных для интерферометрии условиях Большого Кавказа. В частности, методами спутниковой интерферометрии было зафиксировано увеличение скорости движения крупномасштабного оползня в районе села Барановка с 10 до 30 мм/мес. за 3 месяца до его схода. Показано, что успех мониторинга во многом определяется правильной постановкой задачи, выбором частотных диапазонов и периодов съемки, методов оценки полей смещений. Для правильной интерпретации результатов, в частности, для оценки трех компонент вектора смещений по величинам смещений в направлении на спутник, которые дает спутниковая интерферометрия, необходимо привлекать информацию об изучаемом объекте и возможном характере его смещений.

Ключевые слова: радары с синтезированной апертурой, интерферометрия, космический мониторинг, оползневые процессы

Одобрена к печати: 20.09.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-137-147

## Введение

Район Большого Сочи характеризуется высокой оползневой активностью вследствие гористого рельефа, сложенного в основном слабосцементированными водонасыщенными за счет обильных осадков глинистыми породами. В последние годы в связи с увеличением антропогенной нагрузки активность оползней как древних, периодически активирующихся, так и вновь образованных, постоянно возрастает. В связи с этим все более актуальным становится мониторинг активности оползневых склонов, в частности, с применением спутниковых радаров с синтезированной апертурой (PCA интерферометрия или InSAR). К безусловным достоинствам спутниковых методов следует отнести покрытие больших территории, регулярную, с периодом до 5–7 дней, съемку и возможность изучения динамики оползневых структур по архивным снимкам (например, (Notti et al., 2010)). При оценке оползневого риска территорий совместно с наземными методами используются методы устойчивых отражателей (PS, от англ. Persistent Scatterer). Обзор работ можно найти, например, в (Cigna et al., 2013). Условия для применения РСА интерферометрии на Большом Кавказе достаточно сложные: горный рельеф, густая растительность, сравнительно малое количество объектов на оползневых склонах, хорошо отражающих радарный сигнал, переменчивые погодные условия, создающие атмосферные помехи. Цель работы – показать, что комплексирование различных методов РСА интерферометрии при обработке снимков различных диапазонов длин волн позволяет эффективно выполнять как мониторинг активности отдельных оползней, так региональные исследования для детальной оценки и мониторинга оползневых рисков на больших территориях. Статья основана на более чем десятилетнем опыте ИФЗ РАН в области применения РСА интерферометрии для решения различных задач, в частности, для исследования активности оползней в районе Большого Сочи (Дмитриев и др., 2012; Михайлов и др., 2012, 2013; Kiseleva et al., 2014; Киселева и др., 2015).

## Обработка РСА данных: основные проблемы и пути их решения

Эффективность проведения мониторинга во многом определяется тем, насколько полно выбранная технология обработки PCA снимков, применяемые в ее рамках методы и используемые данные соответствуют поставленной задаче, особенностям изучаемого процесса, природным условиям. Ниже мы рассмотрим основные проблемы, возникающие на различных этапах обработки, и возможные пути их решения.

При наличии пары радарных снимков одного участка земной поверхности можно вычислить комплексную интерферограмму, которая представляет собой матрицу, каждый элемент которой равен произведению сигнала первого снимка и комплексно сопряженного сигнала второго снимка. Поскольку снимки производятся с различных точек, фаза интерферограммы зависит не только от смещений поверхности, но и от топографии. Для устранения вклада топографии используются цифровые модели рельефа (ЦМР). Полученная таким образом интерферограмма содержит значения фазового сдвига, свернутые по модулю  $2\pi$ . Далее выполняется развёртка фазы, которая сводится к добавлению необходимого числа полных фазовых циклов к каждому фазовому измерению. Данная технология эффективна, когда в период съемки происходят смещения в несколько длин волны зондирующего сигнала.

При исследовании медленных и малых деформаций полезный сигнал на интерферограмме бывает трудно выделить на фоне различных помех: атмосферных эффектов, ошибок в определении орбит и ЦМР, аппаратурных шумов. Для выделения слабых сигналов разрабатываются методы устойчивых отражателей, основанные на одновременном анализе серии парных интерферограмм, в которой выделяются элементы разрешения, характеризующиеся «устойчивым поведением» на протяжении всего периода съемки. Главное отличие имеющихся модификаций метода устойчивых отражателей (PS-InSAR) состоит в различном математическом определении понятия «устойчивый отражатель».

Идентификации устойчивых отражателей на природных объектах, которые сильно рассеивают радарный сигнал, значительно сложнее, чем на техногенных, хорошо отражающих объектах. Для мониторинга природных объектов разработан ряд технологий (SBAS, StaMPS/MTI, SqueeSAR). В частности, А. Хупер (Hooper et al., 2004) предложил метод, в котором проводится анализ устойчивости фазы отраженного сигнала во времени в предположении, что поле смещений обладает некоторой корреляцией по пространству. Этот метод свободен от гипотез о характере зависимости скорости смещения во времени, что важно для природных, в том числе оползневых, процессов, смещения которых происходят неравномерно. В процессе анализа временных рядов фазовых смещений выполняется фильтрация высокочастотных помех по времени. Это позволяет существенно подавлять атмосферные и орбитальные погрешности, которые меняются от снимка к снимку. При благоприятных условиях метод устойчивых отражателей позволяет оценивать средние скорости смещения различных объектов с точностью до нескольких мм/год.

Увеличение пространственной плотности отражателей на природных объектах с сохранением при этом всей высококачественной информации, полученной в результате анализа высококогерентных точечных отражателей, позволяет существенно уменьшить число ошибок при выполнении развертки фазы и повысить точность оценки полей смещений. Один из возможных подходов к решению этой задачи, реализуемый в настоящее время авторами данной статьи, заключается в следующем. Отражатели на природных ландшафтах часто обнаруживаются в областях с невысокой (на отдельных временных интервалах) когерентностью фаз, в которых многие соседние пиксели показывают схожую отражательную способность, так как они принадлежат одному и тому же природному объекту. Поэтому, прежде всего, проводится процедура адаптивной фильтрации амплитуды стека снимков и выделяются пространственно связанные кластеры статистически однородных (например, в смысле критерия Колмогорова-Смирнова) пикселей. После того как для данного пикселя определено множество статистически однородных «соседей», выполняется фильтрация значения амплитуды во всей временной цепочке снимков в данном кластере, а также значения интерферометрической фазы. Исходя из нашего опыта, даже без проведения последующей фильтрации фазы такой прием значительно увеличивает число идентифицируемых в дальнейшем отражателей на природных склонах.

В целом успех процедуры выделения устойчивых отражателей при отсутствии хорошо отражающих объектов зависит от множества факторов, влияние которых нельзя оценить априори (характер и состояние растительного покрова, атмосферные условия во время съемки, наличие и мощность снегового покрова и т.д.). Для идентификации PS в таких условиях необходим тщательный выбор параметров обработки. При явно недостаточном количестве природных отражающих объектов устанавливают уголковые отражатели. Пример использования УО в районе Большого Сочи приведен в (Михайлов и др., 2013).

Первый этап обработки PCA данных включает проведение корегистрации всех снимков серии со снимком-мастером; построение парных интерферограмм с учетом ЦМР и поправки за кривизну земной поверхности; анализ парных интерферограмм; геокодирование, т.е. привязку радарного изображения и интерферограмм к географическим координатам. Эти процедуры выполнялись нами с использованием свободного программного пакета DORIS.

Далее производится идентификация и выбор PS по стеку интерферограмм; расчет временной серии их фазового сдвига; развертка фазы для полученных PS; введение поправок (атмосферных, орбитальных и топографических); расчет временных серий смещений

и средних скоростей смещений для найденных PS. Эти расчеты были произведены с помощью свободного программного комплекса StaMPS/MTI (Hooper et al., 2007).

Отметим, что интерферометрические исследования включают еще два этапа, которым обычно уделяется меньше внимания. Это подготовительный этап, который начинается со сбора информации об объектах исследований и подбора радарных снимков. Поскольку съемка выполняется локатором бокового обзора под некоторым углом к вертикали, на радарных снимках, выполненных в горной местности, возникают различные искажения: зоны геометрической тени, наложения отражений, сокращения или увеличения расстояний. Важно определить размеры объектов исследований, экспозицию и крутизну склонов, оценить возможные амплитуды или скорости смещений, свойства отражающих объектов (открытые или залесенные склоны, наличие техногенных хорошо отражающих объектов). Если направление смещений на склоне близко к направлению полета спутника, смещения в направлении на спутник оказываются малыми. В этом случае следует выбрать другую орбиту или использовать снимки и с восходящей, и с нисходящей орбиты. Важен и частотный диапазон съемки. Снимки спутников, работающих в низкочастотном волновом диапазоне (ALOS-1 PALSAR-1 (далее ALOS) и ALOS-2 PALSAR-2) обладают большой проникающей способностью и позволяют идентифицировать PS в областях с растительностью или снеговым покровом. Снимки коротковолновых спутников (TerraSAR-X, COSMO-SkyMed) в таких условиях не эффективны, но зато на участках с городской застройкой, благодаря их высокой разрешающей способности, удается идентифицировать существенно большее количество отражателей и, соответственно, получить более детальную картину смещений. Подготовительный этап также включает построение и выбор оптимальной ЦМР, а также выбор снимка-мастера, на который будут корегистрироваться все остальные снимки (описание см. в работе (Дмитриев и др., 2012)).

Исследования в районе Большого Сочи были выполнены нами с использованием снимков с трех спутников: ALOS (L-диапазон, восходящая орбита, длина волны  $\lambda$ =23,4 см, 17 снимков с 22.01.2007 по 17.09.2010), ENVISAT (C-диапазон, нисходящая орбита,  $\lambda$ =5,6 см, 13 снимков с 29.11.2010 по 23.03.2012) и TerraSAR-X (X-диапазон, восходящая орбита,  $\lambda$ =3,1 см, 17 снимков с 24.12.2011 по 13.09.2012). В целом серии снимков с незначительными перерывами покрывают период с января 2007 г. по сентябрь 2012 г. Был выполнен сравнительный анализ трех доступных в сети Интернет ЦМР: SRTM, ACE2 и AsterDEM. Разрешение ЦМР AsterDEM существенно выше, чем SRTM и Ace-2 (30 м против 90 м), но AsterDEM построен по оптическим данным. ACE-2 использует данные альтиметрии для дополнения SRTM, которая в свою очередь имеет пропуски, особенно в горах, что приводит к погрешностям при вычитании фазы, обусловленной топографией. Выбор оптимальной модели для каждого конкретного участка осуществлялся после анализа результатов расчетов.

Очень важен и заключительный этап, на котором выполняется анализ и интерпретация полученных результатов. Следует помнить, что РСА интерферометрия позволяет оценить смещения в проекции на линию визирования спутника (LOS, от англ. line-of-site). Поскольку по одной проекции восстановить три компоненты вектора смещений невозможно, привлекаются дополнительные предположения. Для оползневых склонов можно предположить, что смещение оползня происходит в направлении максимального уклона рельефа. В этом случае по значениям скоростей в направлении LOS, с учетом параметров съемки, экспозиции склонов и их крутизны оцениваются скорости смещения оползня вниз по склону. Подробно процедура восстановления полного вектора смещений изложена в работе (Kiseleva et al., 2014). Подчеркнем, что простой пересчет смещений в направлении LOS в вертикальные смещения путем деления на косинус угла наклона зондирующего луча к вертикали справедлив только при равенстве нулю горизонтальных смещений, что неприемлемо для оползней и многих других процессов (Михайлов и др., 2012).

Иные подходы применяются в случаях, когда за время между повторными съемками произошли очень большие смещения (быстрые смещения оползней и ледников, эпицентральная зона землетрясений) или когда снимки выполнены с большим интервалом во времени. В этих случаях применить рассмотренные выше методы PS-INSAR не удается из-за полной временной декорреляции снимков, но можно выполнить анализ сдвигов пикселей (называемых офсетами) за период между съемками в поле амплитуд отраженных сигналов. Офсеты вычисляются при совмещении (корегистрации) снимков на субпиксельном уровне как в направлении полета спутника, называемого азимутом, так и в направлении, перпендикулярном орбите спутника (т.н. «горизонтальная дальность»). Метод трассирования офсетов часто оказывается единственным средством анализа больших локализованных смещений, он применялся нами для оценки смещений при сходе оползня в пос. Барановка (Киселева и др., 2015).

# Некоторые результаты применения РСА интерферометрии в районе Большого Сочи

По трем наборам собранных нами снимков (ALOS, ENVISAT и TerraSAR-X) были рассчитаны временные серии и средние скорости смещений в направлении на спутник для PS, идентифицированных в районе Большого Сочи. Результаты, полученные по снимкам спутника TerraSAR-X, приведены на *рис. 1*. Там же отмечены подвижные области, наиболее четко выделяемые на всем временном интервале по данным всех трех спутников и совпадающие с оползневыми склонами, выделенными наземными методами (интернет-ресурс (9)). Рассмотрим результаты для трех оползневых склонов с различными для применения методов РСА интерферометрии условиями: пос. Мамайка Центрального района (1), с. Барановка Хостинского района (2) и пос. Молдовка Адлерского района г. Большой Сочи (12).

Оползень в пос. Мамайка. Это обширный древний оползень, состоящий из нескольких оползневых тел. Исследования проводились нами для области железнодорожного тоннеля на участке железной дороги Туапсе–Адлер вблизи пос. Мамайка. Размер исследуемо-



Рис. 1. Средние скорости смещения устойчивых отражателей в направлении LOS по снимкам со спутника TerraSAR-X с 24.12.2011 по 13.09.2012. Цветовая шкала – средние скорости смещений в направлении на спутник за период съемки. Голубой цвет – смещения в сторону спутника красный – от спутника, зеленый цвет – средние смещения близки к нулю. Цифрами обозначены основные оползневые склоны, выявленные и по интерферометрии, и наземными методами

го оползневого склона приблизительно 600 м на 800 м, перепады высот достигают 200 м. На верхней части оползневого склона расположен густонаселенный район со множеством зданий и сооружений, хорошо отражающих радарный сигнал. Здесь хороший результат дают коротковолновые снимки спутника TerraSAR-X. По данным спутниковой интерферометрии этот оползень смещается практически непрерывно с 2007 г. по 2012 г., но скорость его смещений не постоянна. Анализ скоростей смещений вниз по склону позволяет сделать вывод об ускорении движения оползня в рассматриваемый период с 60 мм/год в интервале с 01.2007 по 09.2010 до 75 мм/год в период с 12.2011 по 09.2012.

Нижняя часть оползневого склона, расположенная над железнодорожным тоннелем, покрыта густой растительностью. Здесь отсутствуют объекты, хорошо отражающие радарный сигнал. На этом участке был установлен уголковый отражатель в виде тетраэдра с размером грани 1 м, ориентированный на спутник TerraSAR-X. В результате специальной обработки снимков была получена временная серия смещений этого отражателя, которые очень хорошо согласуются с временными сериями для остальной части оползня. Подробно вопросы установки уголкового отражателя на этом участке, методика и результаты оценки смещений на оползневом склоне в пос. Мамайка изложены в работе (Михайлов и др., 2013).

**Оползень в с. Барановка.** В ночь с 23 на 24 января 2012 года в результате затяжных дождей в селе Барановка сошел обширный оползень. Оползень древний, мощность оползневого тела достигает 10–20 м, размер в плане 800х1200 м. Объем смещенных оползневых масс оценивается примерно в 8,0 млн. м<sup>3</sup>. В зону оползневых процессов попало 35 жилых домов. Смещения составляли метры в сутки.

При столь значительных смещениях применение метода устойчивых отражателей становится невозможным из-за ошибок развертки фазы, возникающих, когда смещения PS между съемками в направлении LOS существенно превышают половину длины волны (28 мми 16 мм для спутников ENVISAT и TerraSAR-X соответственно). Поэтому из имеющихся PCA снимков мы сформировали три серии: снимки ALOS и ENVISAT до схода оползня и снимки спутника TerraSAR-Х после этого события, начиная с 17.02.2012. Анализируя временные серии смещений до схода оползня, полученные при расчетах по методу устойчивых отражателей по сформированным таким образом сериям снимков со спутников ALOS и ENVISAT, мы пришли к выводу, что оползень смещался практически с неизменной скоростью до июля 2011 года. По данным спутника ALOS с 01.2007 по 09.2010 средняя скорость смещений вниз по склону составляла 125 мм/год и 115 мм/год по данным спутника ENVISAT до июля 2011 года. Данные спутника ENVISAT за период с 09.2011 по 12.2011 показали увеличение скорости почти в 3 раза, до 350 мм/год. Анализ временных серий смещений после схода оползня, полученных по снимкам спутника TerraSAR-X, начиная с 17.02.2012, позволяет выделить два периода. В период с 17.02.2012 по 01.04.2012 средние скорости смещения вниз по склону составляли около 80 мм/мес., а в период после 01.04.2012 они снизились до 10 мм/мес.

Для оценки смещений в период интенсивных смещений с 23.01.2012 по 17.02.2012 был применен метод трассирования офсетов, который основан на использовании амплитудных, а не фазовых характеристик и потому свободен от ошибок развертки фазы при больших смещениях. Применение этого метода позволило оценить максимальное смещение, которое достигло 7,5 м, и определить контуры оползня, в том числе и на покрытых растительностью склонах. Подробно суть этого метода, обзор литературы и полученные результаты приведены в работе (Киселева и др., 2015).

**Оползень в пос. Молдовка.** Этот древний обширный оползень активизируется периодически. По наземным наблюдениям последняя его активизация зафиксирована в марте 2012 года на общей площади в 20 тыс. м<sup>2</sup>. Результаты расчетов с применением трех серий снимков представлены на *рис. 2*.

Временные серии, приведенные на *рис. 3* для наиболее активной части оползня, позволяют выделить периоды активизации и относительной стабильности оползневого массива.

Величина средней скорости смещения оползневого массива, оцененная в предположении движения в направлении максимального уклона рельефа, для всего периода спутниковых наблюдений не превышает 100 мм/год, однако скорости смещений в отдельные периоды достигали 150 мм/год и более. Так, средняя скорость смещения вниз по склону с 09.06.2007 по 27.01.2009 была около 150 мм/год (по результатам, полученным при анализе данных со спутника ALOS PALSAR), с 27.01.2011 по 27.06.2011 – более 200 мм/год (по результатам ENVISAT), с 24.12.2011 по 01.04.2012 – более 170 мм/год (по результатам TerraSAR-X). Общее смещение вниз по склону за все исследуемое время съемки с 22.01.2007 по 11.08.2012 составило около 350 мм.



Рис. 2. а) Адлерский район Большого Сочи на карте GoogleEarth. Белый прямоугольник – область вблизи пос. Молдовка, для которой приведены карты средних скоростей смещений на рис. б, в, г. Белым пунктиром выделена область, подверженная оползневым процессам; б), в), г) – карты средних скоростей смещений в направлении LOS для устойчивых отражателей, полученных по данным со спутников ALOS (б), ENVISAT (в) и TerraSAR-X (г) в окрестности пос. Молдовка. Обозначения см. рис. 1. Скорости в направлении LOS для спутника ENVISAT (в) имеют обратный знак, поскольку съемка велась с нисходящей орбиты



Рис. 3. Осредненные временные серии смещений в направлении визирования спутника для устойчивых отражателей из областей, выделенных белым овалом на рис. 2 б–г. Для каждой точки показан доверительный интервал

#### Заключение

1. Опыт ИФЗ РАН показывает, что комплексирование различных методов РСА интерферометрии при обработке снимков различных диапазонов длин волн позволяет успешно изучать оползневые процессы и осуществлять мониторинг их активности даже в сложных для интерферометрии условиях Черноморского побережья Кавказа.

2. Успех мониторинга во многом определяется правильной постановкой задачи, выбором частотных диапазонов и периодов съемки, методов оценки полей смещений. Интерпретация результатов требует привлечения информации об изучаемом объекте и возможном характере его смещений.

3. С помощью РСА интерферометрии было зафиксировано увеличение скорости движения оползня в с. Барановка с 10 до 30 мм/мес. за 3 месяца до его схода. Активизацию смещений можно зафиксировать и наземными методами, но для этого необходимо проводить регулярные наблюдения, что дорого и затруднительно, учитывая огромное количество оползней в районе Большого Сочи. Применение РСА интерферометрии может существенно сократить объем наземных работ.

Авторы благодарят А. Хупера (Университет г. Лидс, Великобритания) и Р. Хансена (Университет г. Делфт, Нидерланды) за постоянное внимание и помощь. Мы признатель-

ны Европейскому космическому агентству (ESA), Немецкому аэрокосмическому центру (DLR) и Японскому космическому агентству (JAXA) за предоставленные снимки. Авторы благодарят Ленгипрометротранс и лично Ю.С. Исаева за финансовую помощь в приобретении радарных снимков. Методическая часть работы выполнена при поддержке РФФИ (грант 16-05-00937).

## Литература

- 1. Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Исаев Ю.С., Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И. Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 130–142.
- Киселева Е.А., Михайлов В.О., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П., Дмитриев П.Н. Комплексирование методов анализа амплитуды и фазы спутниковых радарных снимков для оценки смещений оползневых склонов // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 3. Физ. Астрон. 2015. № 4. С. 87–94.
  Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н., Голубев В.И., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа // Геофизические исследования. 2012. № 3. С. 5–17.
   Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А.,
- Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Дмитриев П.Н., Голубева Ю.А., Исаев Ю.С., Дорохин К.А., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А., Голубев В.И. Мониторинг оползневых процессов на участке Северо-Кавказской железной дороги с использованием спутниковой радарной интерферометрии в различных диапазонах длин волн и уголкового отражателя // Геофизические исследования. 2013. № 4. С. 5–22.
- 5. Cigna F, Bianchini S., Casagli N. How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach. Landslides 10 (3). 2013. P. 267–283.
- Hooper A., Segall P., Zebker H. Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos // J. Geophys. Res. 2007. Vol. 112. B07407. DOI: 10.1029/2006JB004763.
- Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E., Dmitriev P., Golubev V., Timoshkina E., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R. PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus // Elsevier, Proceeding Technology. Vol. 16. P. 404–413. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
   Notti D., Davalillo J.C., Herrera G., Mora O. Assessment of the performance of X-band satellite radar data for
- Notti D., Davalillo J.C., Herrera G., Mora O. Assessment of the performance of X-band satellite radar data for landslide mapping and monitoring: upper Tena Valley case study // Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 2010. Vol. 10. P. 1865–1875.

## Review of the results of application of different methods for SAR image processing to study and monitor landslide activity in the Big Sochi region

## V.O. Mikhailov, E.A. Kiseleva, E.I. Smolyaninova, V.I. Golubev, P.N. Dmitriev, E.P. Timoshkina, S.A. Khairetdinov

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow 123242, Russia E-mail: mikh@ifz.ru

In the paper the key problems of Satellite Radar Interferometry (INSAR) processing and interpretation of results are discussed. Case study is landslide monitoring in the Big Sochi area based on ALOS-1 PALSAR-1, ENVISAT and TerraSAR-X acquisitions for the January 2007 – September 2012 period. Integration of different INSAR methods and incorporation of radar images from satellites with different operating frequency bands permitted us to investigate and monitor landslide activity under unfavorable for interferometry conditions of the Big Sochi. In particular, for the large scale ancient landslide in the Baranovka village the increase of displacement rate from 10 to 30 mm/month was fixed 3 months before rapid landsliding event. It was shown that efficiency of the monitoring depends on the statement of the problem, selection of time of acquisitions with particular frequency bands and methods of estimation of

displacement rates. Reliable interpretation of results, including estimation of three components of the displacement vectors, requires ground based information about study objects and character of their displacements.

Keywords: SAR, interferometry, satellite monitoring, landslides

Accepted: 20.09.2016 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-6-137-147

### References

- Dmitriev P.N., Golubev V.I., Isaev Yu.S., Kiseleva E.A., Mikhailov V.O., Smol'yaninova E.I., Nekotorye pro-1 blemy obrabotki i interpretatsii dannykh sputnikovoi radarnoi interferometrii na primere monitoringa opolznevykh protsessov (On processing and interpretation of the SAR interferometry data in the case of the landslide monitoring), Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 130-142.
- Kiseleva E.A., Mikhailov V.O., Smolyaninova E.I., Timoshkina E.P., Dmitriev P.N., The combination of me-2. thods for analyzing the amplitude and phase of satellite radar images for the estimation of displacements on LandslideAffected Slopes, *Moscow University Physics Bulletin*, 2015, Vol. 70, No. 4. pp. 303–311. DOI: 10.3103/S0027134915040116.
- Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N., Golubev V.I., Smol'yaninova E.I., Timoshkina E.P., Otsenka 3 polnogo vektora smeshchenii zemnoi poverkhnosti i tekhnogennykh ob"ektov po dannym radarnoi sputnikovoi interferometrii dlya oblastei razrabotki mestorozhdenii nefti i gaza (Estimation of full vector of displacements of the Earth' surface and technogenic objects based on InSAR data applied to oil and gas production areas), *Geofizicheskie issledovaniya*, 2012, Vol. 13, No. 3. pp. 5–17. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Smol'yaninova E.I., Dmitriev P.N., Golubeva Yu.A., Isaev Yu.S., Dorokhin K.A.,
- 4 Timoshkina E.P., Khairetdinov S.A., Golubev V.I., Monitoring opolznevykh protsessov na uchastke Severo-Kavkazskoi zheleznoi dorogi s ispol'zovaniem sputnikovoi radarnoi interferometrii v razlichnykh diapazonakh dlin voln i ugolkovogo otrazhatelya (Landslide monitoring at the North Caucasus railroad using SAR data of different wavelength and corner reflector), *Geofizicheskie issledovaniya*, 2013, Vol.14, No. 4, pp. 5–22. Cigna F., Bianchini S., Casagli N., How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer
- 5.
- Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach, *Landslides*, 2013, Vol. 10, No. 3, pp. 267–283. Hooper A., Segall P., Zebker H., Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos, *J. Geophys. Res.*, 2007, Vol. 112, B07407. DOI: 10.1029/2006JB004763. 6.
- Kiseleva E., Mikhailov V., Smolyaninova E., Dmitriev P., Golubev V., Timoshkina E., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R., PS-InSAR monitoring of landslide activity in the Black Sea coast of the Caucasus, 7. Elsevier, Procedia Technology, 2014, Vol. 16, pp. 404-413. DOI: 10.1016/j.protcy.2014.10.106.
- Notti D., Davalillo J.C., Herrera G., Mora O., Assessment of the performance of X-band satellite radar data for 8 landslide mapping and monitoring: upper Tena Valley case study, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2010, Vol. 10, pp. 1865–187