

Некоторые проблемы обработки и интерпретации данных спутниковой радарной интерферометрии на примере мониторинга оползневых процессов

П.Н. Дмитриев¹, В.И. Голубев¹, Ю.С. Исаев², Е.А. Киселева¹,
В.О. Михайлов¹, Е.И. Смольянинова¹

¹*Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук
123995 Москва, Большая Грузинская 10-1
E-mail: mikh@ifz.ru*

²*ОАО НИПИИ «Ленметрогипротранс», Санкт-Петербург, Россия*

Целью данной работы является усовершенствование методики обработки спутниковых радарных снимков для определения смещений поверхности Земли, а также разработка способов интерпретации полученных результатов. Предложен способ выбора «области отсчёта» для случая отсутствия априорной информации о характере смещений поверхности. Разработана методика определения всех компонент вектора смещения с использованием данных с двух различных треков, применимая к оползням и ледникам.

Проведено тестирование разработанных методик применительно к мониторингу оползневых процессов вблизи железной дороги город Адлер – посёлок Красная Поляна. В работе использовались снимки со спутника ENVISAT с восходящего и нисходящего трека. Для интерферометрической обработки применялся свободно распространяемый программный продукт StaMPS.

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

Введение

В последнее время все более широкое распространение получают методы оценки малых смещений земной поверхности, основанные на применении радаров с синтезированной апертурой (спутниковая РСА-интерферометрия или InSAR). РСА-интерферометрия применяется при изучении смещений природных и техногенных объектов. Примерами использования РСА-интерферометрии на природных объектах являются: изучение косейсмических и постсейсмических процессов (Foumelis et al., 2009; Barbort et al., 2008; Назарян и др., 2008; Cakir et al., 2003; Михайлов и др., 2010), мониторинг динамики ледников (Kumar et al., 2009; Johan et al., 1998; Vankataraman et al., 2005), деформаций поверхности вулканов (Hooper et al., 2004; Hooper, 2008; Mikhailov et al., 2011), оползневых процессов (Kimura et al., 2000; Farina et al., 2004; Colesanti et al., 2006; Meisina et al., 2007). Очень широк перечень техногенных объектов мониторинга. Это области разработки нефтяных и газовых месторождений, прокладки над шахтами, тоннелями, мониторинг стабильности мостов и эстакад и многое другое. РСА-интерферометрия имеет ряд преимуществ перед наземными методами. Один радарный снимок покрывает площадь до 100 км² и более. Ячейка разрешения составляет 20 м * 20 м и менее. Интервал повторной съемки составляет от 35 дней для спутника ENVISAT до 6 дней для спутников CosmoSkyMed. Точность оценки смещений составляет первые сантиметры, точность оценки средних скоростей смещений по сериям снимков – первые миллиметры. В настоящее время радарная съемка проводится со спутников ENVISAT, Terrasar-X, Radarsat, CosmoSkyMed. Готовится к запуску в 2013 г. новый европейский спутник Sentinel-1 (Attema et al., 2007). Огромным преимуществом радарной интерферометрии является возможность получать и анализировать архивные снимки, начиная с 1992 г. (спутники ERS-1/2). Это позволяет в частности опробовать новые методы обработки и интерпретации данных на известных событиях.

Имеются два основных метода обработки данных РСА – интерферометрии. Первый, называемый парной интерферометрией (DInSAR), основан на анализе двух снимков, сделан-

ных с некоторым временным интервалом. Для введения необходимых поправок требуется цифровая модель рельефа (ЦМР) и уточненные орбиты. ЦМР может быть получена у различных космических агентств или построена по паре интерферометрических снимков, сделанных в период, когда деформации земной поверхности были малы, например, до землетрясения или с минимальным интервалом во времени, например, при проведении тандемной съемки. В процессе специальной обработки формируется парная интерферограмма, которая позволяет оценить величину проекции вектора смещений отдельных отражающих площадок на направление на спутник (направление видения, Line Of Sight - LOS). Для расчета парных интерферограмм могут быть использованы как коммерческие (Gamma, SARscape), так и свободно распространяемые пакеты, например DORIS (Delft, 2008).

Несмотря на большое количество примеров удачной работы метода парной интерферометрии, оценить смещения удастся далеко не всегда. Часто происходит потеря корреляции сигнала, обусловленная низкой отражающей способностью объектов (особенно, природных), атмосферными условиями, наличием снега или густого растительного покрова и их динамикой во времени, изменением геометрических характеристик орбит при повторной съемке. Возникающее в этих случаях существенное преобладание шума над полезным сигналом не позволяет построить парную интерферограмму удовлетворительного качества.

Для преодоления этих проблем была разработана методика совместного анализа парных интерферограмм для серии спутниковых снимков с выделением некоторого набора пространственных областей или отдельных пикселей, для которых в дальнейшем проводится оценка временных серий смещений. Данная методика названа методикой устойчивых отражателей (Persistent Scatterers или PSInSAR). Анализ временных серий радарных изображений позволяет достаточно эффективно устранить влияние атмосферных помех, неточностей в знании параметров орбиты спутника и ЦМР. Метод работает даже в сложных условиях изрезанного рельефа и густой растительности.

В данной статье мы сначала кратко перечислим основные этапы обработки РСА данных и обсудим методы преодоления некоторых проблем, возникающих в процессе обработки. Далее будет рассмотрен вопрос интерпретации смещений в направлении на спутник (LOS). В качестве иллюстрации будут приведены результаты оценки смещений оползневого склона вблизи строящейся совмещенной автомобильной и железнодорожной трасс от города Адлер к объектам Олимпийский игр 2014 года в поселке Красная Поляна.

Технология обработки данных методом устойчивых отражателей

Основой метода устойчивых отражателей является использование достаточно большого набора РСА-изображений одной и той же территории. Пусть в наличии имеется набор из $N+1$ РСА-изображения. На первом этапе производится построение парных интерферограмм между выбранным «мастером-снимком» и всеми остальными N снимками.

При формировании РСА-изображения размер каждого элемента разрешения (пикселя) в зависимости от спутника равен нескольким метрам и более, тогда как длина волны излучения составляет сантиметры. Таким образом, сигнал от каждого отдельного пикселя состоит из множества когерентных отражений от отдельных объектов, попавших в этот пиксель (дерево, скальный выход, элементы строений и сооружений). При формировании парной интерферограммы по двум радарным снимкам, которые сделаны с одного спутника (совместимыми являлись только ERS 1; 2) в разные моменты времени, из фазы каждого пикселя первого РСА-изображения вычитается фаза соответствующего пикселя второго изображения. Если элементарные отражатели электромагнитных волн, находящиеся в пределах одного пикселя, смещаются относительно друг друга случайным образом за время между снимками, то информация о среднем смещении данного пикселя будет зашумлена. Подобная ситуация

характерна для территорий покрытых густой растительностью. В случае же, когда в пределах одного пикселя находится хорошо отражающий объект, а остальные отражения имеют гораздо меньшую амплитуду и случайное распределение, то после когерентного сложения сигнала выделяется информация о среднем смещении именно этого объекта. Пиксели, имеющие устойчивые фазовые смещения, называются устойчивыми отражателями (Persistent Scatterers).

Возможны различные математические определения устойчивости пикселя. Так в методе А. Феретти (Ferretti, 2001) устойчивым считается пиксель, характер смещения которого во времени близок к заданному (обычно, линейному) закону. А. Хупер с соавторами (Hooper et al., 2004) предложили метод, в котором проводится анализ распределения устойчивых отражателей по пространству. Этот метод свободен от гипотез о том, как меняется скорость смещения во времени. Это важно потому, что для многих природных объектов (вулканы, оползни) характер изменения скорости не известен, но должен быть определен по данным спутниковой интерферометрии. Этот метод реализован в пакете StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers). Этот пакет был разработан в Стенфордском Университете, а в настоящее время он поддерживается и развивается сотрудниками Делфтского Университета, где работает А. Хупер. Метод эффективен для выделения устойчивых отражателей на природных объектах, где интенсивность отражения существенно ниже. Обработка РСА-данных в пакете StaMPS включает четыре основных этапа:

1. Формирование интерферограмм. Здесь применен ряд инноваций, по сравнению с известными пакетами (например, ROI_PAC, DORIS).
2. Идентификация устойчивых отражателей. Здесь используются значения амплитуды и фазы для оценки вероятности устойчивого отражения для каждого пикселя. Вначале делается выбор, основанный только на амплитуде отражения, а затем он уточняется итерационно с использованием значения фазы. По окончании итераций определяется вероятность принадлежности к устойчивым отражателям для тех пикселей, которые не были отобраны изначально.
3. Отбор устойчивых отражателей. Выбираются отражатели, имеющие высокую вероятность, и отбрасываются те, которые устойчивы только на некоторых интерферограммах и те, которые расположены в окрестности отражателей с большей вероятностью.
4. Оценка полей смещений. Здесь проводится развертка фазы и фильтрация помех, вклад которых был оценен на предыдущих стадиях (ошибки, связанные с ЦМР, например).

При практической работе с данными необходимо задавать параметры фильтров, снимок-мастер, параметры введения орбитальных и атмосферных поправок, область отсчёта, относительно которой будет проводиться расчёт смещений. От правильности проведения этих операций существенно зависит точность полученных результатов, особенно если снимки обладают низкой когерентностью или их число невелико. Важным критерием правильности проведения обработки является наземный контроль и использование дополнительной информации.

Методика выбора области отсчёта

Остановимся более подробно на вопросе выбора так называемой области отсчета. Результатом проведения полного цикла обработки являются временные серии смещений для отдельных устойчиво отражающих площадок. При этом временные серии всегда содержат остаточные шумы. Для их устранения могут быть использованы временные серии для заведомо стабильных областей, которые принято называть «областями отсчета». Если такая об-

ласть выделена в пределах исследуемой части радарного изображения, то временные ряды входящих в нее устойчивых отражателей вероятнее всего содержат не устраненные помехи. Следовательно, временные ряды из области отсчета можно использовать для корректировки временных рядов в тех областях, характер помех в которых можно считать идентичным. Коррекция состоит в том, что из фазы каждой парной интерферограммы (фазового сдвига некоторого пикселя для двух заданных интерферометрических изображений) вычитается фаза, являющаяся средним значением разности фаз всех пикселей той же интерферограммы, попавших в выбранную область отсчета.

Чаще всего, в качестве области отсчета выбирается вся исследуемая область и из каждой интерферограммы вычитается среднее значение всех фазовых смещений в ней. Однако этот подход не всегда эффективен, в особенности в тех случаях, когда исследуемая область относительно невелика. Пусть, например, значительную часть исследуемой области занимает оползневой склон, а остальная часть области стабильна. Вычитание среднего приведет к уменьшению скорости на оползне и перенесет часть смещений в стабильные области. В ряде работ расчет ведется относительно выбранного устойчивого отражателя, расположенного в области, которая априори считается стабильной. Однако далеко не всегда заранее имеется информация о наличии и расположении стабильных областей.

В отличие от работ, в которых стабильная область задается априори, нами предложена методика определения устойчивых областей на основе анализа карт когерентности, которые строятся в процессе обработки радарных снимков, а также на основе анализа временных рядов, полученных для предположительно стабильных областей. Интерферометрическая когерентность дифференциальной интерферограммы вычисляется по формуле:

$$\gamma = \frac{|E(z_1 \cdot z_2^*)|}{\sqrt{E(z_1 \cdot z_1^*) \cdot E(z_2 \cdot z_2^*)}},$$

где $E()$ оператора усреднения по пространственному ансамблю, z_1, z_2 - комплексные сигналы, соответствующие одной и той же площадке на поверхности Земли на двух снимках, формирующих дифференциальную интерферограмму, $*$ - оператор комплексного сопряжения. Карта когерентности представляет собой матрицу, каждый элемент которой – значение когерентности, соответствующее своей площадке на поверхности Земли (пиксель дифференциальной интерферограммы). Интерферометрическая когерентность принимает действительные значения из отрезка $[0,1]$ и отражает уровень декорреляции двух изображений. В случае низкой когерентности декорреляция велика, при этом фазовая информация является недостоверной, интерферограмма выглядит как случайное распределение тонов. Высокая когерентность свидетельствует о слабой декорреляции и, как следствие, о высоком качестве измерений, сделанных на основе интерферограммы. Главными источниками декорреляции являются: низкое соотношение сигнал/шум, атмосферные помехи, снег, а также большой временной интервал между снимками. Принято разделять пространственную и временную декорреляцию. Пространственная декорреляция увеличивается с ростом базы интерферометра (расстояния между положениями спутника при повторной съемке), а также при нарушении локальной параллельности орбит. К источникам временной декорреляции относятся нарушение микрорельефа, изменение диэлектрических свойств поверхности в связи с погодными условиями, сезонные изменения растительного покрова, пожарами, затоплением, накоплением / таянием снега и льда т.д.

Высокие значения когерентности обычно демонстрируют объекты техногенного характера (металлические крыши строений, элементы мостов, дорожной инфраструктуры и т.д.), а также протяженные объекты естественного происхождения, которые занимают на интерферограмме несколько пикселей (обнажения, скалы). Такие объекты часто оказыва-

ются стабильными во времени. Если объекты стабильны, то они могут быть использованы для выбора области отсчёта. Таким образом, стабильные во времени объекты следует искать среди тех, которые демонстрируют высокую когерентность. Конечно, выносить решение о стабильности конкретной области необходимо не только на основании данных спутниковой интерферометрии, но и с использованием географической привязки и идентификации отражающего объекта на местности.

В работе предложена следующая методика выбора области отсчёта. В начале определяются точки, обладающие на данной серии снимков максимальной средней когерентностью и находящиеся в непосредственной близости от исследуемой области. Отметим, что точки с высокой когерентностью и устойчивые отражатели, вообще говоря, не должны совпадать, поскольку для определения когерентности используется только пространственное поле отраженного сигнала, а в методе устойчивых отражателей отбор производится, в том числе и по поведению фазового смещения во времени. Таким образом, формируются области – «кандидаты» на область отсчета, состоящие из подмножеств устойчивых отражателей, находящихся внутри областей с центрами в точках с высокой когерентностью. Размеры этих областей естественно выбирать так, чтобы в область попадало минимально возможное для расчетов количество устойчивых отражателей, находящихся максимально близко к точке с высокой когерентностью.

Затем производится расчёт временных серий смещений в точках устойчивых отражателей, попадающих хотя бы в одну из областей – кандидатов на область отсчёта. При этом в качестве «области отсчёта», необходимой для определения смещений и называемой в данном контексте «опорной», используются последовательно все «кандидаты» на область отсчёта.

Далее проводится анализ рассчитанных временных серий. Если временные серии смещений устойчивых отражатели какой-либо области – кандидата на область отсчета демонстрируют значимый тренд и/или большую дисперсию при всех вариантах выбора опорной области, то данная исследуемая область не подходит для использования в качестве области отсчета в дальнейшем исследовании. Если же существует несколько областей, которые демонстрируют близкие к нулю средние скорости взаимных относительных смещений и при этом дисперсии временных серий малы, то велика вероятность, что эти области в действительности стабильны и любая из них может быть использована в качестве области отсчета в основном исследовании.

Следует отметить, что эти несколько областей должны соответствовать различным объектам, а не быть частями одного протяженного объекта, что проверяется с помощью географической привязки и идентификации отражающих объектов на местности.

Описанная выше методика была опробована на данных со спутника ENVISAT по территории вблизи посёлка Красная Поляна. Было использовано 11 снимков с восходящего трека 85A (см. табл. 1). В качестве мастера использовался снимок, сделанный 4 ноября 2007 года. Отметим крайне сложные условия для мониторинга оползневого склона: снимков относительно немного, съемка велась один, редко два раза в год, склон покрыт густой растительностью, на нем отсутствуют хорошо отражающие объекты. В таких условиях выбор правильной стратегии обработки особенно важен.

Таблица 1. Снимки со спутника ENVISAT, трек 85A

<i>№</i>	<i>Дата снимка</i>	<i>Орбита</i>	<i>Центр съёмки</i>	<i>$B_{\perp}$ (м)</i>	<i>T (дней)</i>	<i>F_{dc} (Гц)</i>
1	01.08.2004	16171	43.58, 40.01	-27.9	1173	-610.293213
2	21.08.2005	18183	43.58, 40.01	478	793	-574.215637
3	28.05.2006	22183	43.58, 40.01	334.8	516	-592.029541
4	15.10.2006	24187	43.58, 40.01	-368.3	379	-546.354431
5	26.08.2007	28696	43.58, 40.01	225.2	68	-540.048218
6	30.09.2007	29197	43.58, 40.01	-168.9	34	-555.535706
7	04.11.2007	29698	43.58, 40.01	0	0	0

<i>№</i>	<i>Дата снимка</i>	<i>Орбита</i>	<i>Центр съёмки</i>	<i>$B_{\perp}$ (м)</i>	<i>T (дней)</i>	<i>F_{dc} (Гц)</i>
8	12.09.2007	30199	43.58, 40.01	-448.2	52	-547.718384
9	13.01.2008	30700	43.58, 40.01	83	-69	-543.592163
10	23.03.2008	31702	43.58, 40.01	186.3	-139	-537.831604
11	01.02.2009	36211	43.58, 40.01	-330.9	1173	-582.282959

На основе анализа карт когерентности были отобраны четыре кандидата на область отсчёта. Их географическое положение показано на рис. 1. В дальнейшем был проведён расчёт смещений в местах идентификации устойчивых отражателей с использованием всех четырёх областей отсчёта. На рис. 2 – 5 приведены временные серии PS, входящих в каждую область отсчёта, относительно всех четырёх «опорных» областей отсчёта.

Относительно друг друга наиболее близкими к нулю средними скоростями и минимальными значениями дисперсии обладают две области — coh_2 (постройки вблизи п. Монастырь) и coh_3 (объекты в районе моста через р. Кепша) и, соответственно, их можно использовать в качестве областей отсчёта. Две другие области: coh_1 (постройки на трассе вблизи п. Монастырь) и coh_4 (постройки в п. Чвижепсе), несмотря на высокие значения когерентности, имеют значительно отличающиеся от нуля средние скорости деформации и более высокие значения дисперсии. Вероятное объяснение состоит в том, что за период космического наблюдения эти объекты подвергались реконструкции.

Было также проведено сравнение временных серий, полученных на склоновых участках с оползневой активностью, с использованием выбранных областей отсчёта и среднего по всему используемому фрагменту снимка. На рис. 6 приведены результаты с использованием области coh_3 в качестве области отсчёта.

На рис. 7 приведены результаты при использовании всего фрагмента спутникового снимка в качестве области отсчёта.

Особенно заметно улучшение временных серий при использовании области coh_3 в областях 2 и 3 (рис. 6 и 7). Значительное уменьшение дисперсии свидетельствует о повышении точности оценки смещений в областях PS.

Определение полного вектора смещения

Обратимся теперь к вопросу оценки полного вектора смещения по данным о его проекции на направление на спутник. Итак, данные спутниковой интерферометрии позволяют определить смещения в направлении на спутник (LOS) относительно выбранного радарного изображения, принятого за ноль и получить оценку средней скорости смещений для каждой отражающей площадки, также в направлении LOS. Определение полного вектора смещений (в форме двух углов и модуля вектора или трех составляющих: вверх, на север и на восток) без дополнительных предположений или дополнительных гипотез принципиально невозможно. Если в обработке используются данные с двух треков, нисходящего и восходящего, то в результате будут получены проекции вектора смещений на два различных направления, но для определения полного вектора надо иметь три компоненты.

Необходимые дополнительные данные могут быть получены по результатам наземного мониторинга. В частности, могут быть заданы направления смещений, определенные по геодезическим данным, например с использованием систем спутникового позиционирования GPS или ГЛОНАСС. Известно, что данные спутниковой геодезии значительно более устойчиво оценивают смещения на север и восток, и менее точно по вертикали. Этих двух компонент достаточно, чтобы в сумме с данными о смещениях в направлении LOS, найти все три компоненты вектора смещений.

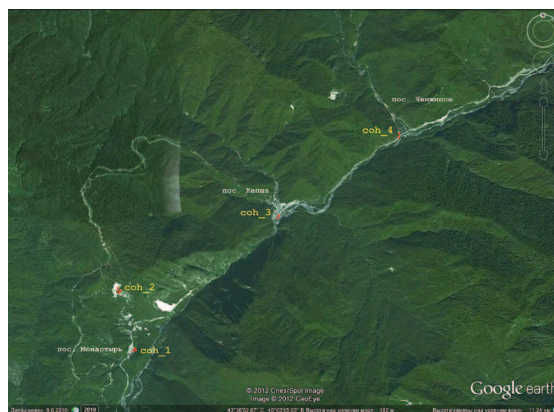


Рис. 1. Кандидаты на область отсчёта: площадки в районе п. Монастырь (coh_1 и coh_2), моста через реку Кепиа (coh_3) и п. Чвежисе (coh_4)

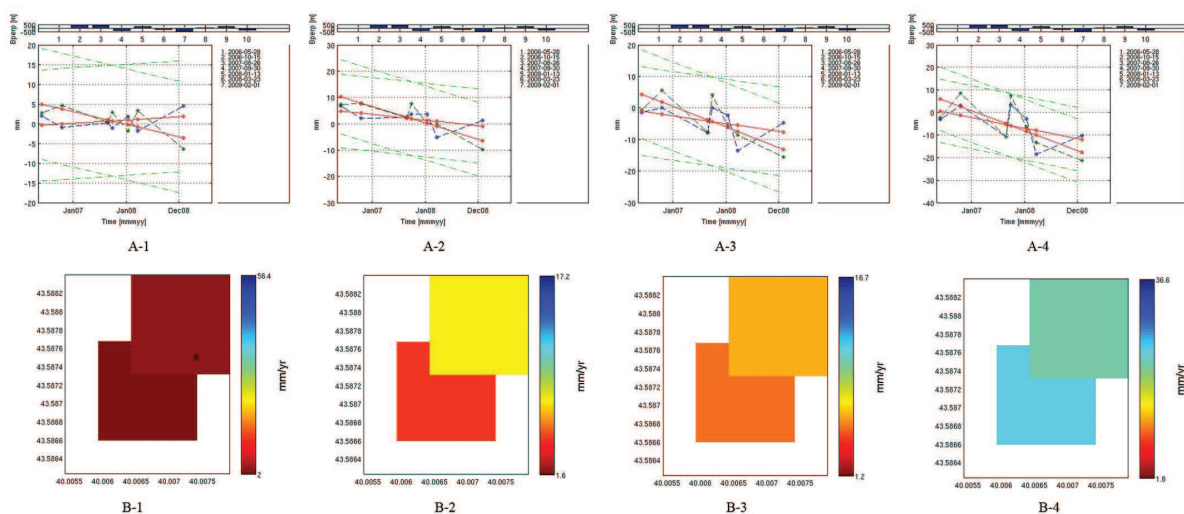


Рис. 2. А – временные серии для смещений в направлении LOS для устойчивых отражателей из области coh_1. Здесь и далее точками одного цвета показана временная серия смещений для одного PS, красным – линейный тренд, зеленым – интервал, в котором должны лежать временные серии, не содержащие ошибок развёртки фазы. В – Дисперсия скорости для этих PS. Использовалась область отсчёта 1 – coh_1, 2 – coh_2, 3 – coh_3, 4 – coh_4

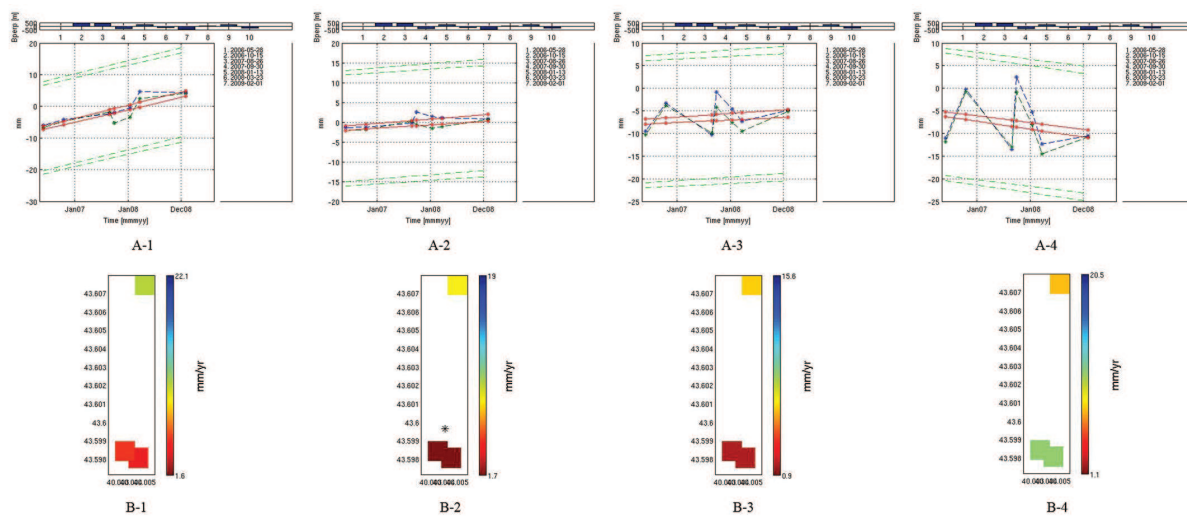


Рис. 3. А – временные серии для смещений в направлении LOS для устойчивых отражателей из области coh_2, В – дисперсия скорости для этих PS. Использовалась область отсчёта 1 – coh_1, 2 – coh_2, 3 – coh_3, 4 – coh_4

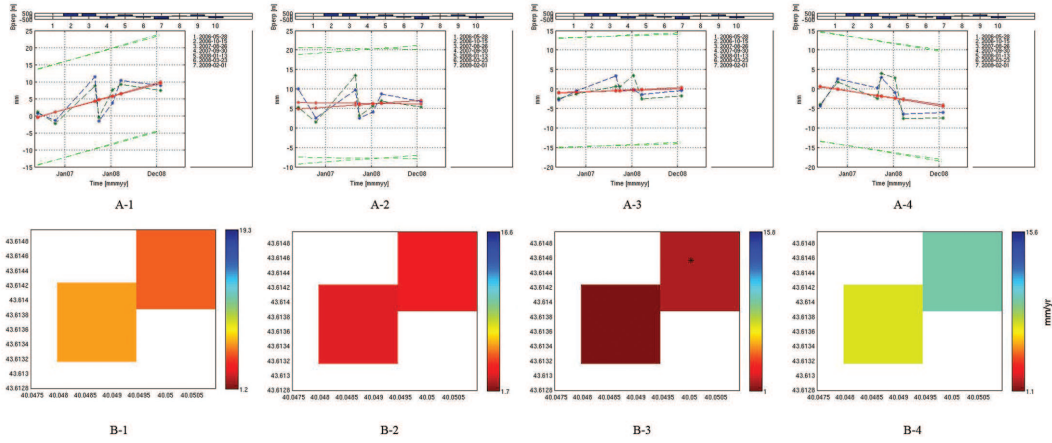


Рис. 4. А – временные серии для смещений в направлении LOS для устойчивых отражателей из области coh_3, В – дисперсия скорости для этих PS. Использовалась область отсчёта 1 – coh_1, 2 – coh_2, 3 – coh_3, 4 – coh_4

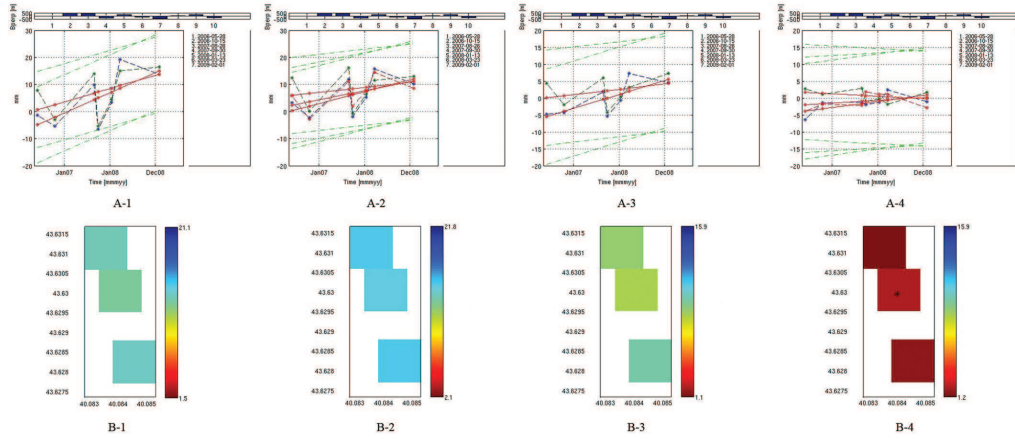


Рис. 5. А – временные серии для смещений в направлении LOS для устойчивых отражателей из области coh_4, В – дисперсия скорости для этих PS. Использовалась область отсчёта 1 – coh_1, 2 – coh_2, 3 – coh_3, 4 – coh_4

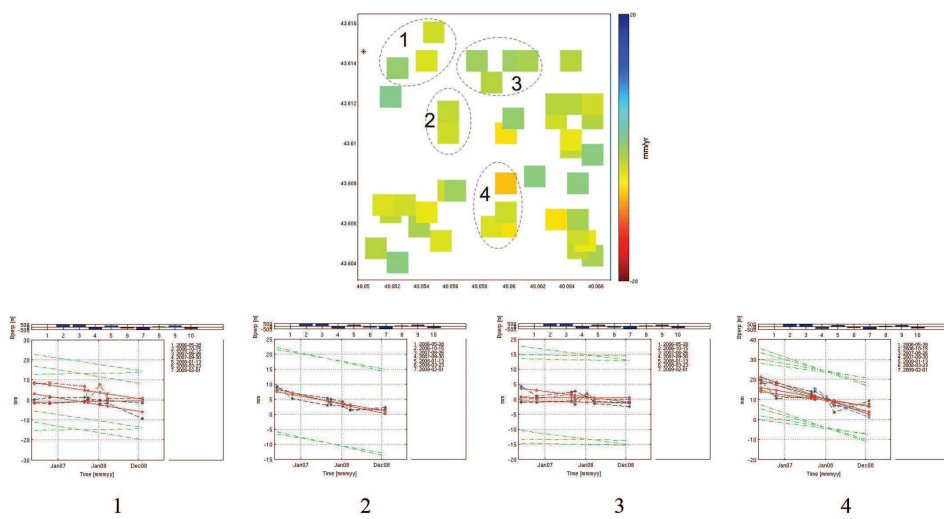


Рис. 6. Скорости смещения PS в направлении на спутник, построенные относительно среднего значения фазы для устойчивых отражателей, расположенных в области coh_3. Временные серии смещений в направлении LOS для соответствующих PS (1 – 4)

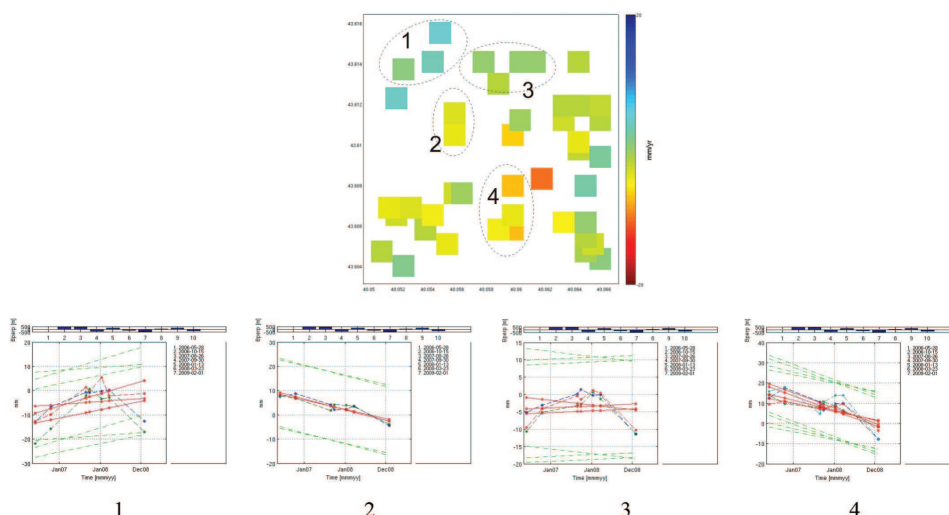


Рис. 7. Скорости смещения PS в направлении на спутник, построенные относительно среднего значения фазы для устойчивых отражателей по всей области расчётов. Временные серии смещений в направлении LOS для соответствующих PS (1 – 4)

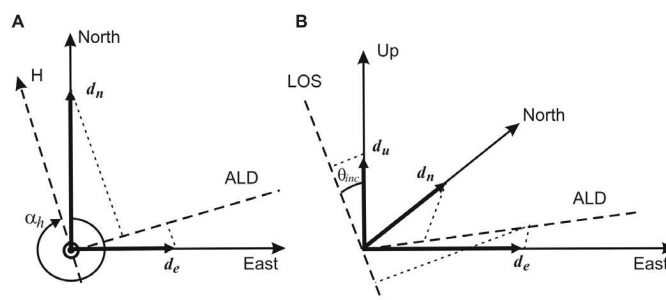


Рис. 8. Компоненты вектора смещений (средней скорости смещений) в направлении вверх, на север и на восток. Слева – вид сверху. – азимут орбиты спутника, который отсчитывается от направления на север по часовой стрелке, ALD – азимут направления видения. Справа – трехмерная картина. – угол видения

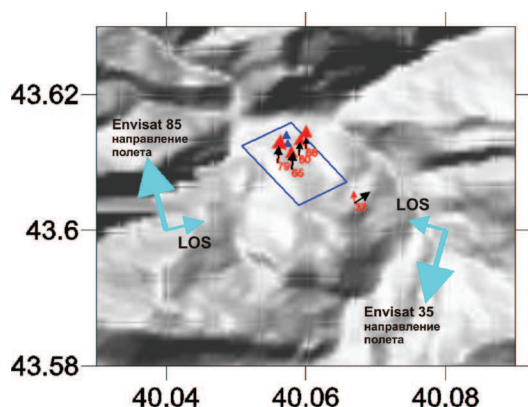


Рис. 9. Восстановление направления смещения устойчиво отражающих площадок в пределах контура мониторинга в предположении, что вертикальная компонента смещения пренебрежимо мала. Черные стрелки – направление градиента рельефа, сглаженное в окне 0.5 x 0.5 км, красные стрелки – направление смещения устойчиво отражающих площадок. Цифры – средняя скорость смещения в мм/год, осредненная за период 2004 – 2010 гг. Синие треугольники – исследовательские скважины

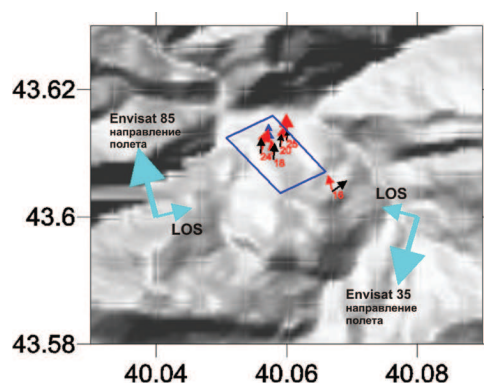


Рис. 10. Восстановление направления смещения устойчиво отражающих площадок в пределах контура мониторинга в предположении, что оползневая пачка пород конформна дневной поверхности. Черные стрелки – направление градиента рельефа, сглаженное в окне 0.5 x 0.5 км, красные стрелки – направление смещения устойчиво отражающих площадок. Цифры – средняя скорость смещения в мм/год, осредненная за период 2004 – 2010 гг. Синие треугольники – исследовательские скважины

Если дополнительных данных нет, то может быть принята гипотеза о том, что направление вектора смещений совпадает с направлением вектора градиента рельефа. Это делается, например, при мониторинге смещений оползней и ледников. В этом случае достаточно знать величину смещения или среднюю скорость, определенные с одного спутникового трека.

Рассмотрим случай, когда смещения определены с двух спутниковых треков, т.е. имеется две проекции вектора на два различных направления. Пусть вектор смещений (или вектор средней скорости смещений) имеет три компоненты (d_u, d_n, d_e) в направлениях соответственно вверх, на север и на восток. Тогда смещение в направлении LOS равно (см. рис. 8):

$$d_{LOS} = d_u \cos \theta_{inc} - \sin \theta_{inc} [d_n \cos \beta + d_e \sin \beta] , \quad (1)$$

где: d_{LOS} – смещение в направлении на спутник, θ_{inc} - угол видения, $\beta = \alpha_h - 3\pi/2$ – азимут направления видения, α_h – азимут орбиты спутника, который отсчитывается от направления на север по часовой стрелке.

Для восходящего трека спутника ENVISAT имеем: $\theta_{inc}=23^\circ$, $\alpha_h=345.6^\circ$, следовательно, $\beta=75.6^\circ$. Отсюда находим:

$$d_{LOS} = d_{up} \cdot 0.921 - d_n \cdot 0.097 - d_e \cdot 0.378 , \quad (2)$$

т.е. здесь заметно преобладает вертикальная компонента над смещениями в горизонтальной плоскости, но также играет роль и смещение на восток. Для нисходящего трека спутника ENVISAT имеем: $\theta_{inc}=23^\circ$, $\alpha_h=195^\circ$, следовательно, $\beta=285^\circ$. Отсюда находим:

$$d_{LOS} = d_{up} \cdot 0.921 - d_n \cdot 0.101 + d_e \cdot 0.377 , \quad (3)$$

т.е. здесь смещение на восток также играет большую роль, при этом в отличие от предыдущей формулы, оно входит со знаком «+». Иногда предполагают, что поскольку коэффициент при смещении на север мал, этой компонентой можно пренебречь и найти смещения в направлении вверх и на восток по данным с двух треков. Чтобы это было так, необходимо, чтобы компонента смещения на север имела тот же порядок, что и две оставшиеся компоненты. Иными словами, без дополнительной информации такой прием применять нельзя.

При использовании данных с восходящего и нисходящего треков, мы имеем две проекции одного и того же вектора на два различных направления LOS.

Рассмотрим два крайних случая на примере данных для оползня в районе строящейся совмещенной железнодорожной и автомобильной трассы Адлер – Красная Поляна. Кроме информации, полученной при обработке снимков с 85A трека ENVISAT (табл. 1), нами были использованы 22 снимка с 35D трека ENVISAT (табл. 2).

Таблица 2. Снимки со спутника ENVISAT, трек 35D

№	Дата снимка	Орбита	Центр съёмки	$B_{\perp}$ (м)	T (дней)	F_{dc} (Гц)
1	23.10.2003	8606	43.59 40.03	544.9	1448,00	208.337540
2	27.11.2003	9107	43.59 40.03	-284.6	1414,00	225.698685
3	15.04.2004	11111	43.59 40.03	-107.9	1276,00	207.132507
4	20.05.2004	11612	43.59 40.03	-77	1241,00	277.059479
5	24.06.2004	12113	43.59 40.03	-421	1207,00	283.437225
6	07.10.2004	13616	43.59 40.03	-91.9	1104,00	280.116455
7	16.12.2004	14618	43.59 40.03	-255.6	1035,00	289.544647
8	24.02.2005	15620	43.59 40.03	-396.7	967,00	281.057800
9	09.06.2005	17123	43.59 40.03	-530.3	862,00	274.404999

<i>№</i>	<i>Дата снимка</i>	<i>Орбита</i>	<i>Центр съёмки</i>	<i>$B_{\perp}$ (м)</i>	<i>T (дней)</i>	<i>F_{dc} (Гц)</i>
10	14.07.2005	17624	43.59 40.03	608.7	827,00	282.873413
11	09.02.2006	20630	43.59 40.03	-735	622,00	326.517944
12	01.11.2007	29648	43.59 40.03	0	0,00	0
13	10.01.2008	30650	43.59 40.03	-369.6	-69,00	319.062347
14	20.03.2008	31652	43.59 40.03	-123.5	-139,00	307.326508
15	05.03.2009	36662	43.59 40.03	114.2	-484,00	318.049469
16	14.05.2009	37664	43.59 40.03	-166.4	-553,00	304.773468
17	23.07.2009	38666	43.59 40.03	-354	-622,00	304.089661
18	05.11.2009	40169	43.59 40.03	-72.4	-724,00	298.177429
19	18.02.2010	41672	43.59 40.03	-415.5	-827,00	314.953857
20	25.03.2010	42173	43.59 40.03	36.3	-864,00	330.680725
21	03.06.2010	43175	43.59 40.03	-21.3	-932,00	327.585999
22	08.07.2010	43676	43.59 40.03	-421.6	-967,00	315.809540

Вначале будем считать, что смещения по вертикали незначительны, т.е. положим $d_{up} = 0$. Найдем в наборах устойчивых отражателей, определенных с двух треков спутника ENVISAT, одни и те же устойчиво отражающие площадки и оценим для них две компоненты вектора смещения. На рис. 9 представлены векторы средних скоростей смещения для найденных совпадающих площадок в пределах выбранной области мониторинга.

Полученные смещения очень близки к направлению вектора градиента рельефа, за исключением точки вне контура мониторинга. Эта точка указывает на смещение в том же направлении, что и точки в контуре, т.е. она предположительно движется со всем оползнем примерно на север.

Положим теперь, что поверхность коренных пород, по которой смещается оползневая пачка пород, конформна дневной поверхности. Тогда устойчивые отражатели будут смещаться вдоль земной поверхности, и любому малому смещению на север и на восток будет соответствовать смещение по вертикали равное:

$$H(\lambda, \varphi) = d_e \cdot \partial H / \partial \lambda + d_n \cdot \partial H / \partial \varphi . \quad (4)$$

Формула (4) задает третье недостающее условие для восстановления полного вектора смещений по данным с двух треков. Здесь λ и φ – долгота и широта соответственно. На рис. 10 представлен результат расчета с применением формулы (4).

Векторы смещений на рис. 10 несколько повернулись относительно векторов, построенных в предположении нулевого смещения по вертикали (рис.9), но общее направление осталось почти тем же. Вторым вариантом представляется нам более предпочтительным. Действительно, пусть угол наклона рельефа составляет от 3 до 5°. Тогда смещению по горизонтали на единицу длины будет соответствовать смещение по вертикали равное тангенсу угла наклона рельефа, т.е. от 0.05 до 0.09. Это величина небольшая, но поскольку коэффициент при смещении вверх в формулах (2 и 3) в 8-9 раз больше, чем при горизонтальных компонентах, вклад вертикальной составляющей, даже при малых углах наклона рельефа, оказывается сравнимым с вкладом смещений в горизонтальной плоскости.

Итак, средняя скорость смещений в районе исследовательских скважин оценивается по второму варианту от 18 до 25 мм/год. Для дальнейшей проверки полученных данных важно привязать найденные устойчиво отражающие точки к плану оползня, построенного по наземным данным, поскольку на исследуемом склоне имеется несколько активных оползневых участков, разделенных участками, на которых не наблюдаются активные оползневые процессы.

Выводы

В работе предложен метод выбора «области отсчёта» для устранения остаточных помех в условиях отсутствия априорных знаний о наличии и расположении стабильных участков земной поверхности. Его применение к реальным спутниковым данным по участку вблизи посёлка Красная Поляна позволило выделить стабильные области вблизи посёлка Монастырь и в районе моста через реку Кепша.

Предложен метод определения всех компонент вектора смещений земной поверхности для оползневых участков, в предположении, что поверхность, по которой смещаются эти объекты, конформна дневной поверхности. С использованием предложенной методики произведена оценка смещений на оползневых склонах вблизи железной дороги город Адлер – посёлок Красная Поляна.

Благодарности. Авторы признательны Европейскому космическому агентству ESA за предоставление снимков в рамках проекта C1P № 7991. Работа частично поддержана Министерством науки и образования в рамках контракта ГК 16.515.11.5032 и грантом РФФИ 12-05-91051-НЦНИ.

Литература

1. Михайлов В.О., А.Н. Назарян, В.Б. Смирнов, М. Диаман, Н. Шапиро, Е.А. Киселева, С.А. Тихоцкий, С.А. Поляков, Е.И. Смольянинова, Е.П. Тимошкина. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 // *Изв. РАН, «Физика Земли»*, 2010. №2. С. 3–16.
2. Назарян А. Н., В. О. Михайлов, Е. А. Киселева, Е. И. Смольянинова, Е. П. Тимошкина, М. Диаман, Н. Шапиро. Применение метода дифференциальной спутниковой интерферометрии для изучения деформаций земной поверхности на примере Алтайского землетрясения 27.09.2003 // *Геофизика*, 2008. №5. с. 69–75.
3. Attema E., Levrini G., Davidson M. Sentinel-1 ESA's new European radar observatory // *The Future of Remote Sensing, Second International Workshop of VITO & ISPRS Inter - Commission Working Group I/V Autonomous Navigation*, 2007.
4. Barbort S., Hamiel Y., Fialko Y. Space geodetic investigation of the coseismic and postseismic deformation due to the 2003 Mw 7.2 Altai earthquake: Implication for the local lithospheric rheology // *J. Geophys. Res.*, 2008. 113. B03403. doi: 10.1029/2007JB005063.
5. Cakir Z., Armijo R., Chabalier J.B., Meyer B., Barka A., Peltzer G. Coseismic and Early Postseismic Slip Associated with the 1999 Izmit Earthquake (Turkey), from SAR Interferometry and Tectonic Field Observations // *Geophysical Journal International*, 2003. Vol. 155. Issue 1. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003-02001.x. P. 93–110.
6. Colesanti C., Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry // *Engineering Geology*, 2006. 88. P. 173–199.
7. Delft object-oriented interferometric software user's manual and technical documentation. Version 4.02 [Text] // Delft institute of earth observation and space systems; Delft university of Technology, 2008. 160 p.
8. Farina P., Colombo D., Fumagalli A., Manunta P., Moretti S. Landslide Risk Analysis by means of Remote Sensing Techniques: Results from the ESA/SLAM Project // *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS 2004)*, Anchorage (USA), 2004. V. 1. P. 62–65.
9. Ferretti A. Permanent scatterers in SAR interferometry // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2001. V. 39. No 1. P. 8–20.
10. Fomelis M., Parcharidis Is., Lagios E., Voulgaris N. Evolution of post-seismic ground deformation of the Athens 1999 earthquake observed by SAR interferometry // *Journal of Applied Geophysics*, 2009. doi. 10.1016/j.jappgeo.2009.02.007.

11. Hooper A., Zebker H., Segall P., Kampes B. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers // *Geophysical Research Letters*, 2004. Vol. 31. L. 23611. doi: 10.1029/2004GL021737.
12. Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches // *Geophysical Research Letters*, 2008. Vol. 35. L. 16302. doi: 10.1029/2008GL034654.
13. Johan M., Niels R., Soren M. Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry // *Nature*, 1998. №391. P. 273–376.
14. Kimura H., Yamaguchi Y. Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry // *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000. Vol. 66. No. 3, P. 337–344.
15. Kumar V., Venkataraman G., Rao Y. SAR interferometry and Speckle tracking approach for glacier velocity estimation using ERS-1/2 and TerraSAR-X spotlight high resolution data // *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2009. doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417663. P. 332–335.
16. Meisina C., Zucca F., Conconi F., Verri F., Fossati D., Ceriani M., Allievi J. Use of Permanent Scatterers Technique for Large-scale Mass Movement Investigation // *Quaternary International*, 2007. P. 90–107.
17. Mikhailov V. O., Kiselyova E. I., Smolyaninova E. I. Regarding the possibility of satellite radar interferometry use for monitoring of the Kuril island arc volcanoes // *Worldwide early warning system of volcanic activities and mitigation of the global/regional consequences of volcanic eruptions*, 2011. P. 151–159.
18. Venkataraman G., Rao Y., Rao K. Application of SAR Interferometry for Himalayan Glaciers // *Proceedings of Fringe 2005 Workshop*, 2005.

On processing and interpretation of the SAR interferometry data in the case of the landslide monitoring

P.N. Dmitriev¹, V.I. Golubev¹, Yu.S. Isaev², E.A. Kiseleva¹,
V.O. Mikhailov¹, E.I. Smolyaninova¹

¹*The Schmidt Institute of Physics of the Earth
123995 Moscow, 10-1 Gruzinskaya str.
E-mail: mikh@ifz.ru*

²*«Lenmetrogiprotrans», St. Petersburg, Russia*

The goal of this article is the improvement of the procedure of processing of satellite radar images for identification of earth surface movements and development of methods for interpretation results obtained. The procedure for choosing of «reference area» in the case of absence of prior information about the movements of the surface is proposed. The method for calculation of all components of displacement vector of landslides and glaciers using two different tracks of satellite was developed.

The methods were tested on the problem of monitoring of landslides near the railway Adler – Krasnaya Polyana. In this study images from the ascending and descending tracks of ENVISAT were used. Interferometry processing was done using free distributed software StaMPS.

Keywords: synthetic aperture radar, interferometry, satellite monitoring, landslides.