

УДК 551.217.3+532.5

## МОНИТОРИНГ ОПОЛЗНЕВЫХ ПРОЦЕССОВ НА УЧАСТКЕ СЕВЕРОКАВКАЗСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ В РАЗЛИЧНЫХ ДИАПАЗОНАХ ДЛИН ВОЛН И УГОЛКОВОГО ОТРАЖАТЕЛЯ

© 2013 г. В.О. Михайлов<sup>1</sup>, Е.А. Киселева<sup>1</sup>, Е.И. Смольянинова<sup>1</sup>, П.Н. Дмитриев<sup>1</sup>,  
Ю.А. Голубева<sup>2</sup>, Ю.С. Исаев<sup>3</sup>, К.А. Дорохин<sup>3</sup>, Е.П. Тимошкина<sup>1</sup>,  
С.А. Хайретдинов<sup>1</sup>, В.И. Голубев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

<sup>3</sup> ОАО НИПИИ “Ленметрогипротранс”, г. Санкт-Петербург, Россия

По данным спутниковой радарной интерферометрии за десятилетний период с июля 2003 г. по май 2013 г. проведена оценка активности оползневого склона на участке Туапсе–Адлер Северокавказской железной дороги. Проанализирована динамика изменения скорости смещений во времени для различных участков оползневого массива методом устойчивых отражателей. Использовались 38 радарных снимков со спутника *ENVISAT* (нисходящий трек 35D, С-диапазон с длиной волны 5.6 см) для трех временных интервалов (2003–2006; 2007–2010; 2010–2012 гг.) и 38 снимков со спутников *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* (восходящий трек 54A, X-диапазон с длиной волны 3.1 см) для двух временных интервалов (2011–2012; 2012–2013 гг.). Удалось локализовать несколько участков со средними скоростями смещения в направлении на спутник >40 мм/год. Средние скорости смещений в разные периоды не совпадают; показано, что эти различия не могут быть связаны с различной геометрией спутниковой съемки и, вероятнее всего, отражают динамику оползневого процесса. В целом наблюдается тенденция увеличения скорости смещений во времени.

Обоснованы параметры искусственного отражателя, установленного в ноябре 2012 г. на участке склона, где отсутствуют естественные отражатели радарного сигнала. Временная серия смещений искусственного отражателя по данным спутников *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* хорошо согласуется с временными сериями естественных отражателей, расположенных на соседних участках. Средняя скорость смещения искусственного отражателя в направлении на спутник составила 49.5 мм/год. Установка искусственного отражателя позволила заметно расширить область мониторинга за счет покрытой густой растительностью части склона, где ранее не было идентифицировано естественных устойчивых отражателей.

Полученные результаты демонстрируют эффективность применения спутниковой радарной интерферометрии с использованием снимков С- и X-диапазонов в условиях Северного Кавказа как для решения задачи локализации оползневых тел, так и для мониторинга их подвижности во времени.

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

### Введение

Спутниковая интерферометрия, основанная на анализе данных радаров с синтезированной апертурой (спутниковая РСА-интерферометрия или *InSAR*) – один из активно развивающихся методов дистанционного зондирования Земли. Важными приложениями метода являются построение цифровой модели рельефа и оценка полей смещения природных и техногенных объектов. Существенный прогресс в области мониторинга

смещения объектов на земной поверхности был достигнут в последние годы благодаря развитию так называемых методов устойчивых отражателей, основанных на анализе временных серий РСА-изображений. Первые модификации этого метода, предложенного в работе [Ferretti, Prati, Rocca, 2001] и основанного на анализе амплитуды отраженного сигнала, позволяли фиксировать смещения техногенных и некоторых природных объектов, обладающих высокой и стабильной во времени отражающей способностью. Предполагалось, что устойчивые отражатели либо смещаются по известному закону, например, с постоянной скоростью, либо они достаточно стабильны во времени, что позволяет выделить деформационный сигнал, отфильтровав атмосферные, топографические и другие фазовые ошибки. С помощью этих методов были получены высокоточные оценки смещения техногенных устойчивых отражателей на городских территориях, в областях разработки нефтяных, газовых и рудных месторождений, проводился мониторинг стабильности мостов, эстакад и т.п.

Более сложной задачей представляется оценка смещения природных объектов, отражения от которых имеют меньшую амплитуду и малую когерентность во времени. До последнего времени хорошие результаты удавалось получить только для больших смещений, которые можно зафиксировать на парной интерферограмме, например, при изучении ко- и постсейсмических процессов [Cakir et al., 2003; Barbort, Hamiel, Fialko, 2008; Назарян и др., 2008; Fomelis et al., 2009; Михайлов и др., 2010], смещений ледников [Johan, Niels, Soren, 1998; Vankataraman, Rao Y., Rao K, 2005; Kumar, Venkataraman, Rao, 2009]. Ситуация кардинально изменилась после публикации работы [Hooper, Segall, Zebker, 2004], в которой при идентификации  $PS^1$  было предложено анализировать не только амплитуду, но и фазу отраженного сигнала в предположении, что поля смещений природных объектов, а следовательно и фазы отраженных сигналов, обладают некоторой коррелированностью не только во времени, но и в пространстве. Это позволило выделять слабо когерентные устойчивые отражатели на природных склонах, в том числе и покрытых растительностью. С применением названной технологии были исследованы деформации поверхности вулканов [Hooper, Segall, Zebker, 2004; Hooper, 2008; Mikhailov, Kiselyova, Smolyaninova, 2011], оползневые процессы [Kimura, Yamaguchi, 2000; Farina et al., 2004; Colesanti, Wasowski, 2006; Meisina et al., 2007; Дмичурев и др., 2012; Mikhailov et al., 2013], смещения земной поверхности на нефтяных и газовых месторождениях (см., например, [Михайлов и др., 2012]).

К настоящему моменту космическими агентствами накоплена огромная база радарных снимков с различных спутников – *ERS-1/2*, *ALOS*, *ENVISAT*, *RADARSAT*, *CosmoSkyMed*, *TerraSAR-X*. В ближайшее время планируется запуск новых, технически более совершенных спутников, *ALOS-2* и *Sentinel-1* [Geudtner et al., 2013]; данные последнего будут размещаться в сети Интернет в свободном доступе. Все отмеченное создает перспективы для расширения прикладных исследований, совершенствования технологий обработки и интерпретации РСА-данных с целью повышения точности и достоверности оценок полей смещений.

Настоящая статья посвящена проблемам применения спутниковой интерферометрии для оценки активности оползневых склонов (в том числе покрытых растительностью и с малым количеством объектов, хорошо отражающих радарный сигнал) с использованием методов анализа статистических свойств помех и адаптивной фильтрации [Hooper, Segall, Zebker, 2004]. Отметим, что успех процедуры выделения  $PS$  при отсутствии хорошо отражающих радарный сигнал объектов зависит от множества факторов, влияние которых нельзя оценить априори (характер и состояние растительного покрова, атмосферные условия во время съемки, наличие и мощность снегового покро-

---

<sup>1</sup>  $PS$  – аббревиатура английского термина *Persistent Scatterer*, используемого для обозначения устойчивого отражателя.

ва и пр.). Для идентификации в исследуемой области достаточного для получения надежных результатов количества  $PS$  необходимы тщательный выбор параметров обработки и, возможно, отбраковка низко когерентных снимков. При явно недостаточном количестве идентифицируемых природных устойчивых отражателей может помочь установка искусственных.

В статье кратко описана использованная авторами методика поиска устойчивых отражателей. Приведены результаты обработки снимков со спутников *ENVISAT*, *TerraSAR-X* и *TanDEM-X* (далее *TerraSAR*) за десять лет с августа 2003 по май 2013 гг. для района, включающего оползневой склон на участке Туапсе–Адлер Северокавказской железной дороги вблизи пос. Грузинская Мамайка, и выполненной интерпретации полученного поля смещений. Помимо этого описана конструкция уголкового отражателя, представлены результаты обработки снимков со спутников *TerraSAR* после его установки и временная серия смещения соответствующего ему устойчивого отражателя.

В настоящей работе авторы продолжают развитие предложенных ими ранее [Дмитриев и др., 2012] подходов к спутниковому мониторингу оползневых склонов.

### Методика поиска устойчивых отражателей

Метод устойчивых отражателей основан на анализе серии парных интерферограмм, построенных относительно одного фиксированного снимка, называемого “мастером”. С учетом конечной разрешающей способности антенны значение в каждом пикселе интерферограммы является векторной суммой отражений спутникового сигнала от всех объектов, попавших в ячейку разрешения. Если отражающие объекты в пределах пикселя смещаются хаотически, например, если область покрыта густой растительностью, то суммарное отражение будет меняться случайным образом и суммарная фаза не будет коррелированной. Если же в пределах ячейки находится объект с более сильным отражением (например, скальный выступ, крыша дома, ствол дерева или просто открытое пространство между деревьями), то его вклад будет доминировать над случайными отражениями от остальных объектов, например, от растительности. При сохранении такого соотношения на протяжении всего периода съемки данный пиксель может быть идентифицирован как устойчивый отражатель  $PS$  [Hooper, Segall, Zebker, 2004]. Ясно, что отмеченные соотношения для разных диапазонов длин волн могут меняться.

В пакете *StaMPS* [Hopper et al., 2010] реализована следующая методика поиска  $PS$ . На первом этапе проводится анализ дисперсии амплитуды сигнала в каждом пикселе, завершающийся устранением высокодисперсных точек. Основной целью этого анализа является сокращение объема входной информации, существенно влияющего на суммарное время обработки. Далее сигнал (фазовый набег) в каждом элементе интерферограммы представляется в виде:

$$\varphi_{x,i} = \varphi_{def,x,i} + \varphi_{\alpha,x,i} + \varphi_{orb,x,i} + \varphi_{\varepsilon,x,i} + n_{x,i}. \quad (1)$$

В данной формуле фазовый набег складывается из смещений поверхности в проекции на направление визирования ( $\varphi_{def,x,i}$ ), разницы в атмосферных условиях в моменты съемки ( $\varphi_{\alpha,x,i}$ ), неточного знания орбиты спутника ( $\varphi_{orb,x,i}$ ), ошибок цифровой модели рельефа ( $\varphi_{\varepsilon,x,i}$ ) и различных шумов ( $n_{x,i}$ ); индекс  $i$  – номер интерферограммы; индекс  $x$  – пространственное положение пикселя на ней. Устойчивыми отражателями считаются те пиксели, в которых первые четыре члена в правой части уравнения (1) на протяжении всей временной серии значительно преобладают над последним. Для многих природных процессов, таких как оползни, ледники, вулканы, можно предположить, что поле деформаций обладает некоторой коррелированностью в пространстве. Характерный масштаб атмосферных процессов обычно существенно больше области исследова-

ний, поэтому атмосферные задержки сигнала  $\varphi_{\alpha,x,i}$  также пространственно коррелированы в пределах снимка; медленно меняются в пространстве и орбитальные ошибки  $\varphi_{orb,x,i}$ .

Далее проводится серия пространственно-временных фильтраций, которая позволяет выделить суммарную пространственно коррелированную составляющую слагаемых в правой части уравнения (1), обозначенную как  $\tilde{\varphi}_{x,i}$ , и  $\hat{n}_{x,i}$  – сумму шума  $n_{x,i}$  и пространственно некоррелированных составляющих остальных членов правой части уравнения (1) [Hooper, Segall, Zebker, 2004]. Именно оценка шума  $\hat{n}_{x,i}$  используется для расчета фазовой дисперсии каждого пикселя и выбора тех, в которых дисперсия шума не превосходит заданного порога. Стоит отметить, что полученный таким образом набор  $PS$  (правильнее называть их “кандидатами” в  $PS$ ) не является окончательным. В дальнейшем с учетом переоценки фазовых поправок по значениям  $\tilde{\varphi}_{x,i}$  в местах расположения “кандидатов” данный набор может быть расширен за счет точек, отброшенных на этапе анализа амплитудной стабильности. Хотя рассмотренный подход и является довольно трудоемким с точки зрения машинного времени, он позволяет выделять существенно больше устойчивых отражателей в областях, где отсутствуют техногенные объекты.

### Оценка подвижности оползневых склонов в районе пос. Грузинская Мамайка

*Район исследований.* Исследования проводились в районе железнодорожного тоннеля на участке Туапсе–Адлер Северокавказской железной дороги вблизи пос. Грузинская Мамайка; мониторинг методом спутниковой радарной интерферометрии выполнялся в области, ограниченной на рис. 1 белым контуром. В этом районе по наземным данным отмечаются разномасштабные явления, которые могут быть связаны с оползневыми процессами – разрушение дорог и строений, переваливание грунта через подпорные стенки и др. Практическая задача данной работы состояла в том, чтобы с помощью спутниковой интерферометрии идентифицировать такие участки и проследить динамику их смещений.



**Рис. 1.** Схема района исследований. Белым контуром ограничена область проводимого мониторинга

Снимки, использованные при расчетах смещений. Район исследований покрывается снимками со спутников *ENVISAT* (трек 35D, нисходящий) и *TerraSAR* (трек 54A, восходящий); направления полета спутников и линии визирования см. на рис. 2–5. Длина волны спутника *ENVISAT* составляет 5.6 см; спутники *TerraSAR* существенно более коротковолновые – длина волны 3.1 см. Снимки отобраны из баз данных Европейского космического агентства (*ESA*) и Немецкого аэрокосмического центра (*DLR*). Снимки со спутника *ENVISAT* из базы *ESA* относятся к периоду 08.2003–03.2012 гг.; снимки со спутников *TerraSAR* из базы *DLR* – к периоду 12.2011–05.2013 гг. Перечень отобранных снимков с указанием даты съемки и номера орбиты приведен в таблицах 1, 2.

Снимки со спутника *ENVISAT* (табл. 1) при обработке были разделены на три временные серии: 14.08.2003–09.02.2006 гг.; 01.11.2007–08.07.2010 гг. (выделены курсивом); 29.11.2010–21.03.2012 гг. (выделены полужирным шрифтом), что связано с двумя обстоятельствами. Во-первых, разность фаз на интерферограмме равна величине смещения отражателя в направлении на спутник, пересчитанной через длину волны в радианы и свернутую по модулю  $2\pi$ . Для восстановления величины смещения по интерферограмме выполняется операция фазовой развертки. Поскольку задача фазовой развертки не имеет единственности, ее решение ищется при дополнительных предположениях, основным из которых является то, что сдвиг между двумя соседними в пространстве (или во времени) значениями фазы не превосходит  $\pi$ . Временной интервал между снимками №№ 14, 15 (см. табл. 1) составляет почти 1.5 года. Поэтому при использовании снимков со спутника *ENVISAT* с длиной волны 5.6 см для корректного выполнения фазовой развертки смещение в направлении на спутник за это время не должно превышать 28 мм (скорость смещения не более 19 мм/год). Поскольку и по наземным данным, и по результатам обработки радарных снимков скорости смещений превосходят это значение, снимки для периода 14.08.2003–09.02.2006 гг. (№№ 1–14 в табл. 1) при обработке были выделены в отдельную серию.

**Таблица 1.** Перечень снимков со спутника *ENVISAT* (трек 35D, нисходящий) из базы *ESA*

№	Время съемки	Номер орбиты	№	Время съемки	Номер орбиты
1	14.08.2003	7604	20	<i>05.11.2009</i>	<i>40169</i>
2	23.10.2003	8606	21	<i>10.12.2009</i>	<i>40670</i>
3	27.11.2003	9107	22	<i>18.02.2010</i>	<i>41672</i>
4	15.04.2004	11111	23	<i>25.03.2010</i>	<i>42173</i>
5	20.05.2004	11612	24	<i>03.06.2010</i>	<i>43175</i>
6	24.06.2004	12113	25	<i>08.07.2010</i>	<i>43676</i>
7	07.10.2004	13616	<b>26</b>	<b>29.11.2010</b>	<b>45739</b>
8	11.11.2004	14117	<b>27</b>	<b>29.12.2010</b>	<b>46170</b>
9	16.12.2004	14618	<b>28</b>	<b>28.01.2011</b>	<b>46601</b>
10	24.02.2005	15620	<b>29</b>	<b>29.03.2011</b>	<b>47463</b>
11	31.03.2005	16121	<b>30</b>	<b>28.04.2011</b>	<b>47894</b>
12	09.06.2005	17123	<b>31</b>	<b>27.06.2011</b>	<b>48756</b>
13	14.07.2005	17624	<b>32</b>	<b>27.07.2011</b>	<b>49187</b>
14	09.02.2006	20630	<b>33</b>	<b>25.09.2011</b>	<b>50049</b>
15	<i>01.11.2007</i>	<i>29648</i>	<b>34</b>	<b>25.10.2011</b>	<b>50480</b>
16	<i>20.03.2008</i>	<i>31652</i>	<b>35</b>	<b>24.11.2011</b>	<b>50911</b>
17	<i>05.03.2009</i>	<i>36662</i>	<b>36</b>	<b>24.12.2011</b>	<b>50342</b>
18	<i>14.05.2009</i>	<i>37664</i>	<b>37</b>	<b>22.02.2012</b>	<b>52204</b>
19	<i>23.07.2009</i>	<i>38666</i>	<b>38</b>	<b>23.03.2012</b>	<b>52635</b>

**Таблица 2.** Перечень снимков со спутников *TerraSAR* (трек 54А, восходящий) из базы *DLR*

№	Спутник	Время съемки	№	Спутник	Время съемки	№	Спутник	Время съемки
1	TSX-1	24.12.2011	14	TSX-1	09.07.2012	<b>27</b>	<b>TDX-1</b>	<b>21.12.2012</b>
2	TSX-1	04.01.2012	15	TSX-1	31.07.2012	<b>28</b>	<b>TSX-1</b>	<b>12.01.2013</b>
3	TSX-1	17.02.2012	16	TSX-1	11.08.2012	<b>29</b>	<b>TSX-1</b>	<b>23.01.2013</b>
4	TSX-1	28.02.2012	17	TSX-1	22.08.2012	<b>30</b>	<b>TDX-1</b>	<b>03.02.2013</b>
5	TSX-1	10.03.2012	18	TSX-1	13.09.2012	<b>31</b>	<b>TDX-1</b>	<b>14.02.2013</b>
6	TSX-1	21.03.2012	19	TDX-1	24.09.2012	<b>32</b>	<b>TDX-1</b>	<b>25.02.2013</b>
7	TSX-1	01.04.2012	20	TSX-1	05.10.2012	<b>33</b>	<b>TDX-1</b>	<b>08.03.2013</b>
8	TSX-1	23.04.2012	21	TSX-1	16.10.2012	<b>34</b>	<b>TDX-1</b>	<b>19.03.2013</b>
9	TSX-1	04.05.2012	22	TDX-1	27.10.2012	<b>35</b>	<b>TSX-1</b>	<b>21.04.2013</b>
10	TSX-1	15.05.2012	23	TDX-1	07.11.2012	<b>36</b>	<b>TSX-1</b>	<b>02.05.2013</b>
11	TSX-1	26.05.2012	24	TDX-1	18.11.2012	<b>37</b>	<b>TSX-1</b>	<b>13.05.2013</b>
12	TSX-1	06.06.2012	<b>25</b>	<b>TSX-1</b>	<b>29.11.2012</b>	<b>38</b>	<b>TDX-1</b>	<b>24.05.2013</b>
13	TSX-1	17.06.2012	<b>26</b>	<b>TSX-1</b>	<b>10.12.2012</b>			

Во-вторых, 22.10.2010 г. была выполнена коррекция орбиты спутника *ENVISAT*, в результате чего совместная интерферометрическая обработка снимков, сделанных до коррекции орбиты и после нее, стала невозможной. По этой причине серия снимков после 22.10.2010 г. (снимки №№ 26–38, выделенные полужирным шрифтом в табл. 1) также обрабатывалась отдельно.

На покрытом растительностью участке исследуемого склона, где устойчивые отражатели ранее не идентифицировались, 22.11.2012 г. был установлен уголкового отражатель (*CR*<sup>1</sup>). В связи с этим снимки со спутников *TerraSAR* также были разделены на две серии – до и после установки *CR*. Используемый авторами метод поиска устойчивых отражателей исключает те из них, которые устойчивы только на части интерферограмм [*Hooper, Segall, Zebker, 2004*]. Поэтому при обработке полной серии из 38 снимков со спутников *TerraSAR*, в которой первые 24 снимка относятся к периоду до установки уголкового отражателя, устойчиво отражающая площадка на его месте идентифицирована быть не может. Этим объясняется то, что серия снимков со спутников *TerraSAR* была при обработке разделена на две части: снимки №№ 1–24 (24.12.2011–18.11.2012 гг.) и №№ 25–38 (29.11.2012–24.05.2013 гг.); последние выделены в табл. 2 полужирным шрифтом.

Таким образом, при дальнейших расчетах использовались пять серий снимков – три серии снимков со спутника *ENVISAT* и две со спутников *TerraSAR*.

*Результаты расчетов скоростей смещений.* Обработка пяти вышеперечисленных серий снимков выполнялась с использованием программного пакета *StaMPS*. Полученные распределения устойчиво отражающих площадок и оценки средних скоростей смещений в направлении визирования спутника  $V_{LOS}^2$  представлены на рис. 2–3.

Если  $V_{LOS} > 0$ , это означает, что за покрываемый серией снимков временной интервал расстояние от устойчивого отражателя до спутника в проекции на *LOS* в среднем сократилось, т.е. отражатель сместился по направлению к спутнику; если  $V_{LOS} < 0$  – смещение отражателя произошло по направлению от спутника.

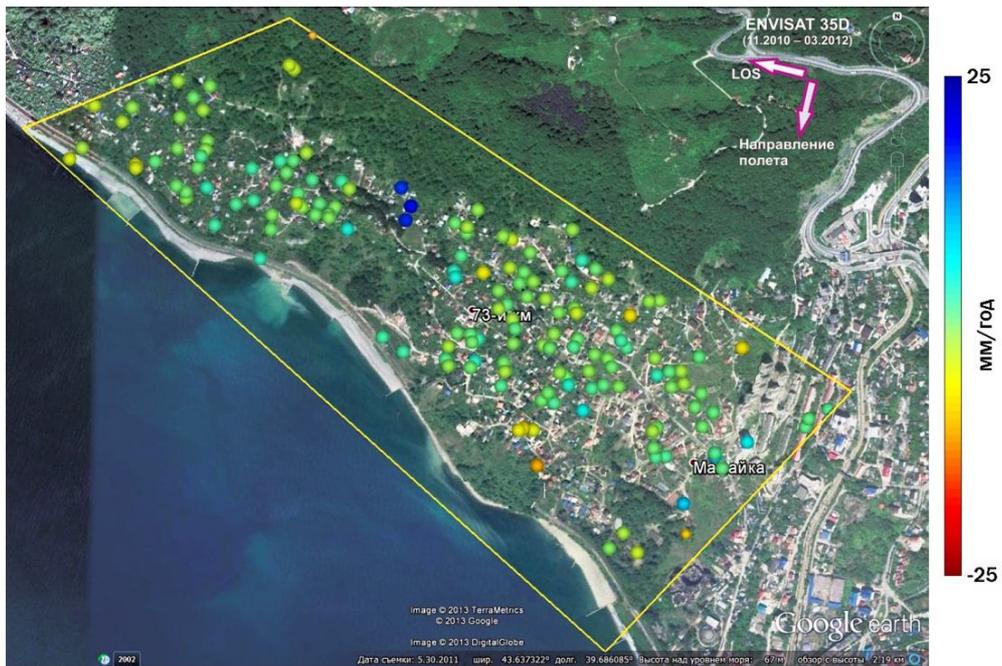
<sup>1</sup> *CR* – аббревиатура английского термина *Corner Reflector*, используемого для обозначения уголкового отражателя.

<sup>2</sup> *LOS* – аббревиатура английского термина *Line-of-Sight*, используемого для обозначения направления визирования спутника.

*Интерпретация результатов.* Рассмотрим главные особенности распределения устойчиво отражающих площадок идентифицированных по разным наборам снимков.

Количество идентифицированных устойчиво отражающих площадок в области мониторинга существенно увеличивается со временем. По снимкам со спутника *ENVISAT* за три последовательных периода наблюдений – 14.08.2003–09.02.2006 гг., 01.11.2007–08.07.2010 гг. и 09.11.2010–23.03.2012 гг. – было идентифицировано соответственно 181, 299 и 881 *PS* (рис. 2).

*а*



*б*

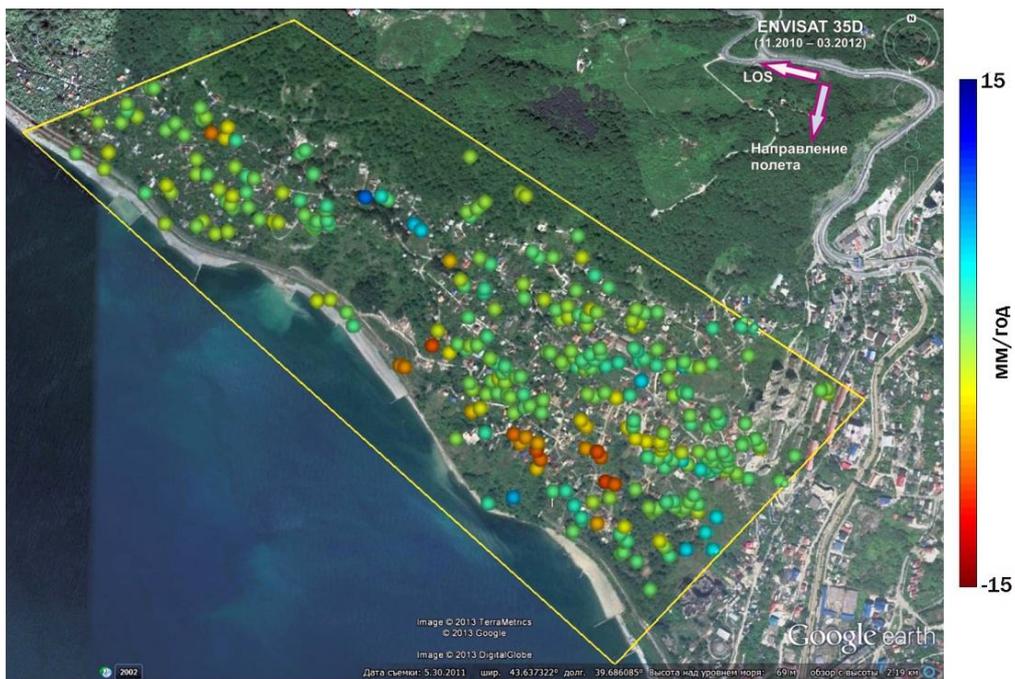
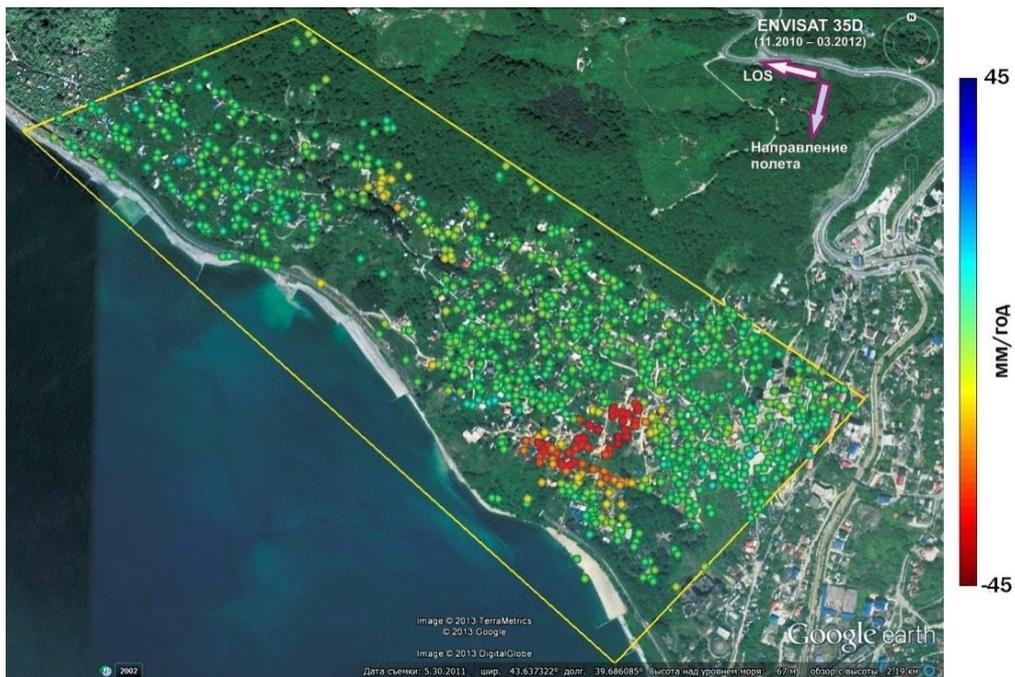
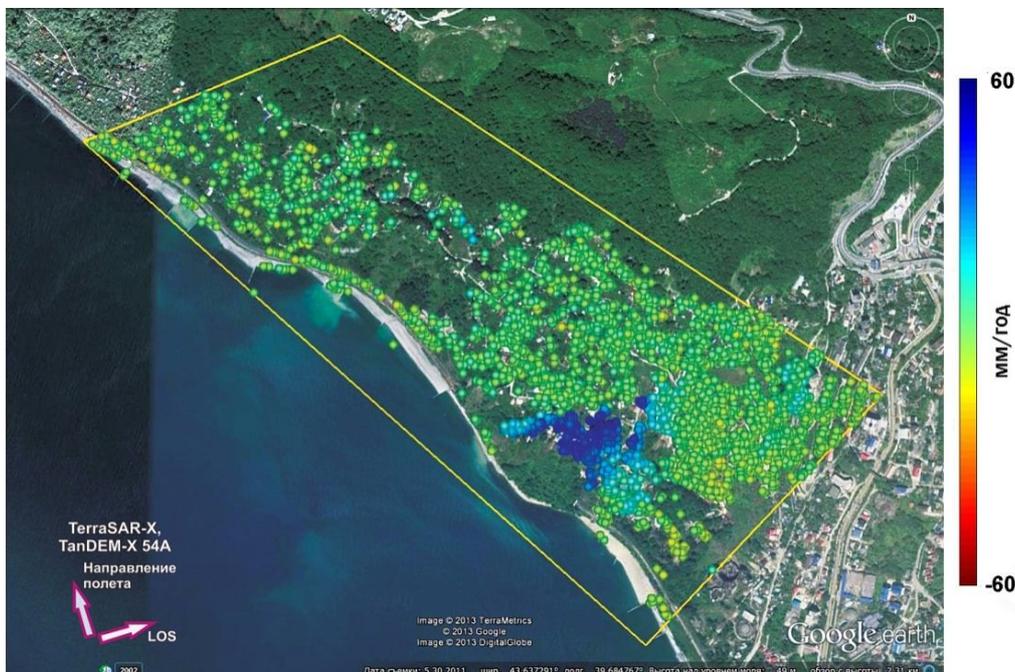


Рис. 2.

## 6



**Рис. 2.** Средние скорости смещений в направлении визирования спутника для *PS*, идентифицированных при обработке снимков со спутника *ENVISAT* (трек 35D, нисходящий) для трех периодов: *a* – 14.08.2003–09.02.2006 гг. (181); *б* – 01.11.2007–08.07.2010 гг. (299); *в* – 09.11.2010–23.03.2012 гг. (881). В скобках – количество *PS* в области мониторинга



**Рис. 3.** Средние скорости смещений в направлении визирования спутника для *PS*, идентифицированных при обработке серии снимков со спутников *TerraSAR* (трек 54A, восходящий) для периода 24.12.2010–18.11.2012 гг. Количество *PS* в области мониторинга – 2938

Увеличение числа идентифицируемых отражающих площадок связано, во-первых, с интенсивным строительством в исследуемой зоне, сопровождаемым ростом числа техногенных объектов, являющихся хорошими отражателями. Во-вторых, поскольку после коррекции орбиты спутника *ENVISAT* временной интервал между снимками составляет один, максимум два месяца, в процессе обработки могли быть идентифицированы те быстро смещающиеся *PS*, которые не были найдены на предыдущих менее детальных сериях снимков из-за временной декорреляции.

Количество устойчиво отражающих площадок по данным спутников *TerraSAR* для периода 24.12.2010–18.11.2012 гг. составило 2938 (см. рис. 3). Такое большое количество идентифицированных *PS* в этом случае объясняется меньшей длиной волны и большей разрешающей способностью спутников *TerraSAR* по сравнению со спутником *ENVISAT*, а также очень высокой когерентностью снимков вследствие более коротких периодов наблюдений в каждой серии.

Как это видно на рис. 2–3, активная часть оползня проявляется с ростом числа *PS* все более четко. Следует отметить отсутствие устойчиво отражающих площадок на протяжении всего периода наблюдений на юго-западной оконечности оползневого массива в районе железнодорожного тоннеля. Поскольку этот участок покрыт густой растительностью, здесь ни при каких параметрах обработки ни в одной серии наблюдений не удалось идентифицировать устойчиво отражающие площадки. Для оценки скорости смещения на этом участке был использован искусственный уголкового отражатель; результаты обработки снимков после его установки приведены в следующем разделе.

Для детального анализа динамики смещений на исследуемой территории было выбрано несколько участков, характеризующихся согласованными движениями (рис. 4, см. с. 17): 1 – участок над выходом из железнодорожного тоннеля (южный портал); 2 – участок над южной частью тоннеля; 3 – участок над центральной частью тоннеля; 4 – участок над выходом из тоннеля (северный портал); 5 – участок к северу от выхода из тоннеля (в направлении к пос. Дагомыс).

По рассчитанным временным сериям для пяти разных интервалов времени была оценена средняя скорость смещений устойчивых отражателей, расположенных вблизи каждого из названных участков (табл. 3).

**Таблица 3.** Средние скорости смещений в направлении визирования спутника

№ участка	Средняя скорость *, мм/год				
	<i>ENVISAT</i> (35D)			<i>TerraSAR</i> (54A)	
	08.2003–02.2006	11.2007–07.2010	11.2010–03.2012	12.2011–11.2012	11.2012–05.2013
1	–	1.3	3.8	–3.1	–4.3
2	–10.3	–5.1	–18.3	28.4	25.3
3	–8	–8.3	–31.4	41.2	63.2
4	0.2	–1.1	–4.0	3.7	1.7
5	17.2	4.8	–12.0	14.4	82.4

\* Поскольку линии визирования спутника *Envisat* на нисходящем треке и спутников *TerraSAR* на восходящем треке почти противоположны (угол  $\sim \pi$ ), смещения отражающих площадок в одном и том же направлении имеют в проекции на *LOS* этих спутников противоположные знаки.

Оценки, приводимые в табл. 3, выполнены для трех интервалов – 14.08.2003–09.02.2006 гг., 01.11.2007–08.07.2010 гг., 29.11.2010–23.03.2012 гг. – по данным спутника *ENVISAT* и для двух – 24.12.2011–18.11.2012 гг. и 29.11.2011–24.05.2013 гг. – по данным спутников *TerraSAR*. Результаты, полученные на последнем из перечисленных временных интервалов, описаны в заключительной части статьи. В целом, из табл. 3 следует, что средние скорости смещения в направлении визирования спутника относительно невелики, хотя и наблюдается некоторая активизация оползневых процессов.

Следует еще раз подчеркнуть, что в табл. 3 приведены не истинные значения средних скоростей, а их проекции на линию визирования спутника. В зависимости от крутизны и ориентации склона, на котором расположены устойчивые отражатели, истинные значения средних скоростей могут быть значительно выше. Так, средняя скорость смещения на участке 2, как это будет показано далее, по данным спутников *TerraSAR* может достигать 150 мм/год.

*Анализ полученных оценок средних скоростей смещений в проекции на LOS.* Рассмотрим сначала наиболее близкие интервалы наблюдения: 11.2007–07.2010 гг. и 11.2010–03.2012 гг. для спутника *ENVISAT* и 12.2011–11.2012 гг. для спутников *TerraSAR*. Попробуем оценить, являются ли различия в средних скоростях смещений в направлении *LOS* следствием разной геометрии съемки и корректировки орбиты спутника *ENVISAT*, выполненной 22.10.2010 г., или эти различия отражают динамику оползневого процесса. Рассмотрим участки 2 и 3, на которых смещения максимальны (см. рис. 4).

Оба спутника проводят съемку с отклонением луча вправо относительно направления полета. Для них справедливо следующее соотношение, связывающее три компоненты скорости смещений *PS* со скоростью смещений в направлении *LOS* [Дмитриев и др., 2012]:

$$v_{LOS} = v_{up} \cos \theta_{inc} - \sin \theta_{inc} (v_e \cos \alpha_{head} - v_n \sin \alpha_{head}). \quad (2)$$

В приведенной формуле  $v_{up}$  – вертикальная компонента вектора скорости смещений;  $v_n$  – компонента, направленная на север;  $v_e$  – компонента, направленная на восток;  $\theta_{inc}$  – угол видения;  $\alpha_{head}$  – азимут орбиты спутника, который отсчитывается по часовой стрелке от направления на север. Положительным считается смещение по направлению к спутнику.

Пусть смещение происходит вниз по склону в направлении азимута  $\gamma$ , а угол наклона вектора смещений к горизонту составляет  $\beta^\circ$  ( $0 \leq \beta \leq \pi/2$ ). Тогда три компоненты вектора смещений будут равны:

$$v_{up} = -|v| \sin \beta, \quad v_e = |v| \cos \beta \sin \gamma, \quad v_n = |v| \cos \beta \cos \gamma. \quad (3)$$

Подставляя соотношения (3) в формулу (2) получаем:

$$v_{LOS} = -|v| [\cos \theta_{inc} \sin \beta + \sin \theta_{inc} \cos \beta \sin(\gamma - \alpha_{head})]. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует несколько полезных соотношений.

1. Пусть склон обращен к спутнику и смещение происходит вниз по нему в направлении на спутник. В этом случае и для восходящего, и для нисходящего треков  $\pi \leq \gamma - \alpha_{head} \leq 2\pi$ ,  $\sin(\gamma - \alpha_{head}) \leq 0$  и, согласно формуле (4), средняя скорость смещений  $v_{LOS}$  в зависимости от соотношения  $\theta_{inc}$  и  $\beta$  может быть как положительной, так и отрицательной. В частном случае, когда движение параллельно направлению *LOS* (азимут равен  $\alpha_{head} + 3\pi/2$ ),  $v_{LOS} = -|v| \sin(\beta - \theta_{inc})$  и проекция скорости смещений на направление *LOS* будет положительной при не слишком крутом рельефе ( $\beta < \theta_{inc}$ ). При больших

углах наклона ( $\beta > \theta_{inc}$ ) проекция скорости смещений на направление  $LOS$  будет отрицательной.

2. Если склон обращен от спутника и смещение происходит вниз по склону в направлении от спутника, то  $0 \leq \gamma - \alpha_{head} \leq \pi$ ,  $\sin(\gamma - \alpha_{head}) \geq 0$  и, согласно формуле (4),  $v_{LOS}$  всегда меньше нуля. В частном случае движения параллельно направлению  $LOS$  справедливо соотношение  $v_{LOS} = -|v| \sin(\beta + \theta_{inc})$ , и проекция скорости смещений на направление  $LOS$  при движении вниз по склону также всегда отрицательна при всех допустимых  $\theta_{inc}$  и  $\beta$ .

3. Если смещение происходит в горизонтальной плоскости ( $\beta=0$ ), то при движении параллельно орбите  $\gamma - \alpha_{head} = 0$  или  $\gamma - \alpha_{head} = \pi$ ,  $v_{LOS} \equiv 0$ , т.е. смещения в этих направлениях не будут зарегистрированы. При смещении по рельефу, который наклонен от спутника ( $\beta > 0$ ), пропуска смещений не происходит, поскольку скорость  $v_{LOS}$  всегда отлична от нуля (отрицательна). При смещении по рельефу, обращенному к спутнику, всегда можно найти такой азимут смещения  $\gamma$ , зависящий от значений  $\beta$  и  $\theta_{inc}$ , для которого  $v_{LOS} = 0$ . При этом  $\gamma$ ,  $\beta$  и  $\theta_{inc}$  связаны соотношением:

$$\sin(\alpha_{head} - \gamma) = \tan(\beta) \tan^{-1}(\theta_{inc}). \quad (5)$$

В частности, для использованных в данной работе снимков с восходящего трека спутников *TerraSAR*  $\theta_{inc} = 45.2^\circ$ ,  $\alpha_{head} = 350.8^\circ$ . Для умеренного угла наклона вектора смещений  $\beta = 5^\circ$  находим, что при смещении по азимутам  $\gamma = 175.7^\circ$  и  $\gamma = 345.9^\circ$   $v_{LOS} = 0$ . В районе южного выхода из тоннеля возможны смещения с близким азимутом  $\gamma = 190-200^\circ$ . Принимая для этой области угол наклона рельефа  $\beta = 5^\circ$ , находим, что истинная скорость смещений в этом случае должна быть в 3.5–6 раз больше скорости смещений в направлении на спутник, т.е. может достигать 150 мм/год.

Выясним теперь, могут ли изменения средних скоростей в направлении  $LOS$ , приведенные в табл. 3, быть связанными лишь с изменением геометрии съемки. Для нисходящего трека спутника *ENVISAT* до коррекции орбиты угол видения составлял  $\theta_{inc} = 22.6^\circ$ , склонение орбиты –  $\alpha_{head} = -165.4^\circ$ ; после коррекции орбиты –  $\theta_{inc} = 40.6^\circ$  и  $\alpha_{head} = -165.6^\circ$ . Для ответа на поставленный вопрос, согласно формуле (4), надо знать угол наклона рельефа  $\beta$ .

Рассмотрим два случая –  $\beta = 5^\circ$  и  $\beta = 20^\circ$ , выбрав их как граничные значения, характерные для исследуемого склона. Проекции средних скоростей на направление  $LOS$  после коррекции орбиты спутника *ENVISAT* получились примерно в 3.7 раза больше, чем до коррекции (см. табл. 3). Такое соотношение для угла наклона рельефа, а также и вектора смещений  $\beta = 5^\circ$  достигается при азимутах смещения  $\gamma = 31.6^\circ$  и  $\gamma = 177.4^\circ$ . При угле наклона  $\beta = 20^\circ$  искомое соотношение средних скоростей смещения в направлении  $LOS$  не достигается ни при каких азимутах смещений. Аналогично, отношение средних скоростей в направлении  $LOS$ , полученных по спутникам *TerraSAR*, к средним скоростям в направлении  $LOS$ , полученным по спутнику *ENVISAT* после коррекции орбиты, составляет примерно –1.4. Такое соотношение для угла наклона рельефа  $\beta = 5^\circ$  достигается при азимутах  $\gamma = 85^\circ$  и  $\gamma = 217^\circ$ . При  $\beta = 20^\circ$  такое соотношение не достигается ни при каких азимутах направления вектора смещений.

Для исследуемого оползневого склона азимуты  $31.6^\circ$  и  $85^\circ$  соответствуют смещениям вверх по склону, азимуты  $177.4^\circ$  и  $217^\circ$  – смещениям вниз по склону. Однако, исходя из уравнения (4), смещение по любому из указанных азимутов невозможно, так как в этом случае значение  $|v|$  было бы отрицательным. Поэтому для исследуемого

оползнего склона расхождения оценок средних скоростей в направлении  $LOS$ , полученных по данным разных спутников в разные периоды, не может быть связано лишь с коррекцией орбиты и геометрией съемки. Вероятнее всего, расхождения в полученных значениях средних скоростей смещений в направлении  $LOS$  объясняются динамикой оползнего процесса.

### Использование уголкового отражателя для мониторинга оползневых процессов вблизи пос. Грузинская Мамайка

*Конструкция уголкового отражателя.* В нижней части исследуемого оползнего склона над железнодорожным тоннелем не удалось идентифицировать устойчиво отражающих площадок с помощью снимков  $C$ - и  $X$ -диапазонов (см. рис. 2–3), что, вероятнее всего, связано с наличием здесь густой растительности. Для оценки скорости смещений в этой области был установлен уголкового отражатель, который представляет собой металлический прямоугольный тетраэдр с взаимно перпендикулярными отражающими гранями (рис. 5). Особенность данной конструкции  $CR$  – его высокий коэффициент обратного отражения в довольно широком диапазоне углов падения.

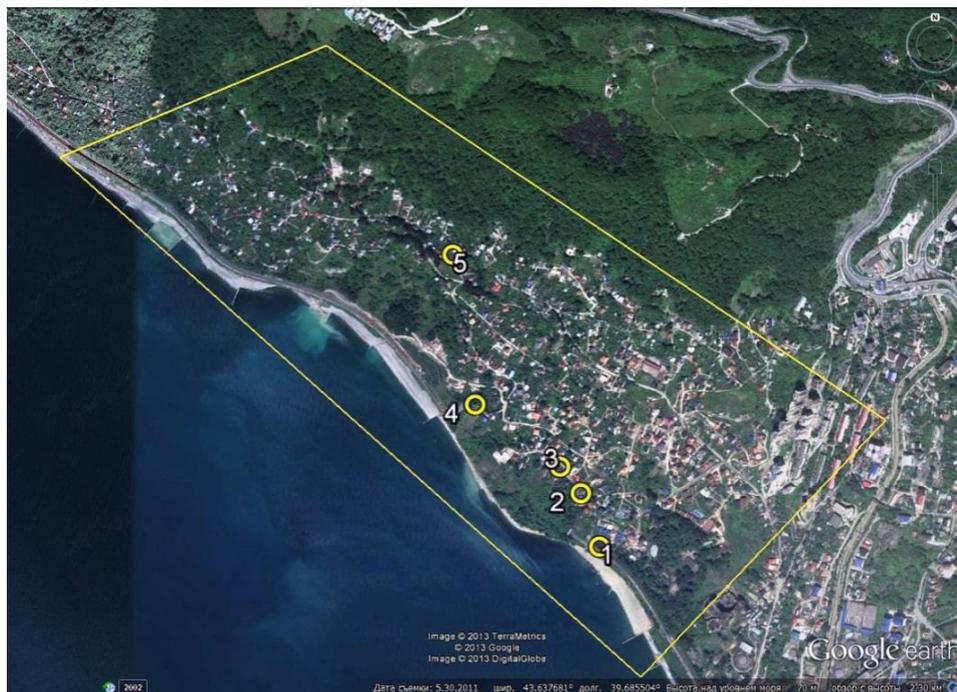
Одной из основных характеристик уголкового отражателя является эффективная площадь рассеяния (далее ЭПР). По определению, ЭПР – это площадь поверхности фиктивного идеального изотропного отражателя, который, будучи помещенным в точку расположения цели нормально к направлению облучения, создает в точке расположения ту же плотность потока мощности, что и реальная радиолокационная цель. Данная характеристика конкретного  $CR$  зависит от его формы, размеров, материала и ориентации по отношению к падающей волне. Отметим, что для некоторых простейших конструкций получены аналитические оценки ЭПР, пригодные для использования на этапе проектирования реального уголкового отражателя. Значение ЭПР для прямоугольного тетраэдра может быть оценено по формуле:

$$\sigma = \frac{4\pi}{3\lambda^2} a^4, \quad (5)$$

где  $a$  – длина ребра;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Конструкция уголкового отражателя разрабатывалась так, чтобы его можно было идентифицировать как на снимках спутников с радарами  $X$ -диапазона излучения (*TerraSAR* с длиной волны 3.1 см), так и со спутников с радарами  $C$ -диапазона (*ENVISAT* с длиной волны 5.6 см). Для этого грани прямоугольного тетраэдра были сделаны длиной 1 м. При этом, поскольку в апреле 2012 г. спутник *ENVISAT* прекратил свое существование, ориентация  $CR$  производилась так, чтобы направление излучения спутников *TerraSAR* совпадало с центральной линией тетраэдра. Согласно формуле (5) ЭПР отражателя составляет примерно 4360 м<sup>2</sup>.

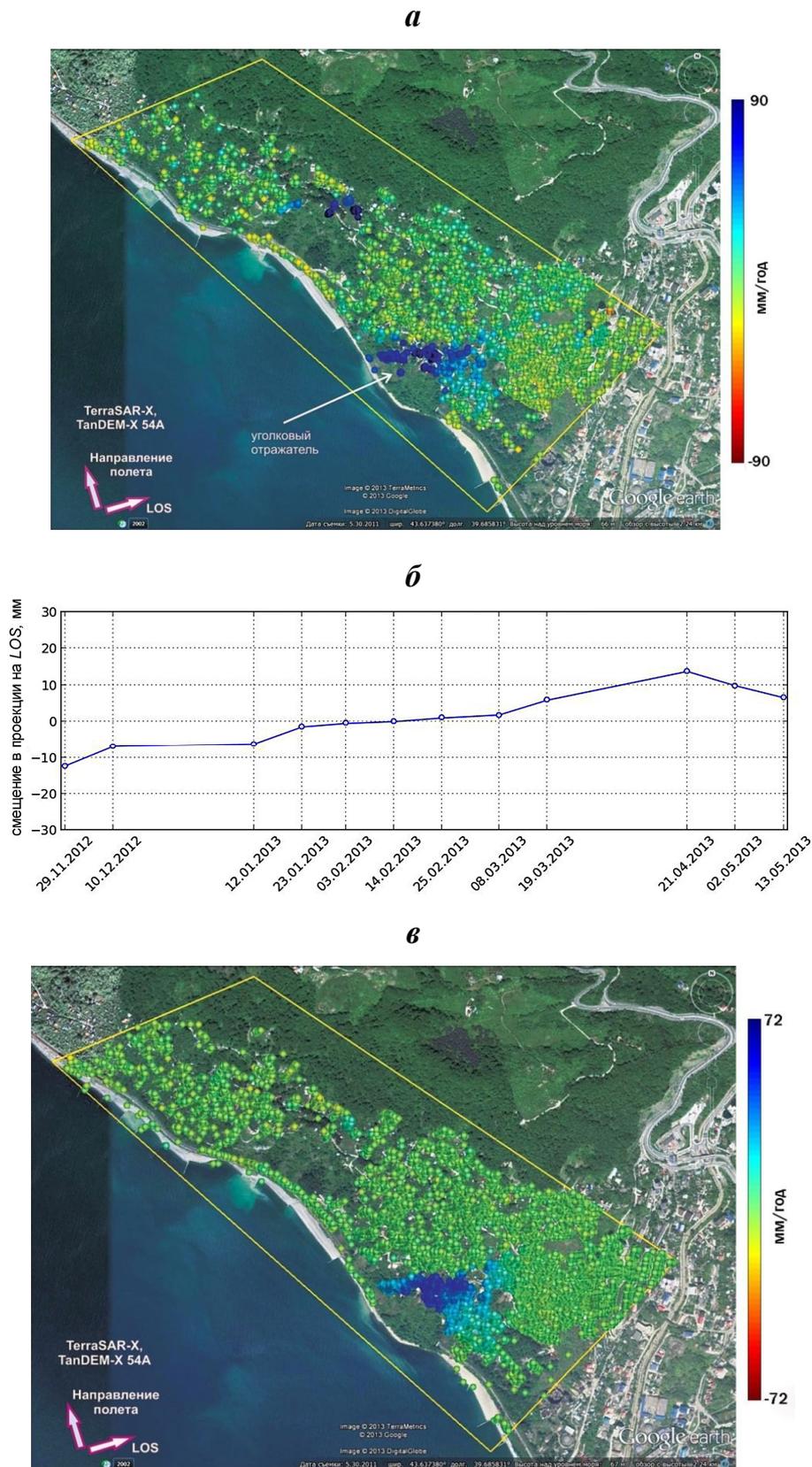
*Временная серия смещения PS, идентифицированного на месте установки уголкового отражателя.* Установленный на оползнемом склоне в ноябре 2012 г. уголкового отражатель четко виден на радарных снимках. После накопления достаточно длинной серии снимков стала возможна оценка скорости его смещений. На рис. 6, а цветом показана средняя скорость смещения в проекции на  $LOS$  для  $PS$ , идентифицированных по серии снимков с 29.11.2012 по 24.05.2013 гг. (14 снимков, выделенных полужирным шрифтом в табл. 2). В процессе обработки в области установки уголкового отражателя идентифицирована устойчиво отражающая площадка, временная серия для которой приведена на рис. 6, б. Средняя скорость смещения в направлении  $LOS$  составила 49.5 мм/год.



**Рис. 4.** Участки детального анализа динамики смещений. 1–5 – номера участков, используемые в тексте



**Рис. 5.** Общий вид уголкового отражателя, установленного на оползневом склоне



**Рис. 6.** Средние скорости смещений в направлении визирования спутника для *PS*, идентифицированных при обработке снимков со спутников *TerraSAR* (трек 54A, восходящий) для периодов 29.11.2012–24.05.2013 гг. (а), 29.11.2011–24.05.2013 гг. (в) и временная серия смещения в проекции на линию визирования спутника для устойчиво отражающей площадки, идентифицированной на месте установки уголкового отражателя (б)

Проведенный эксперимент по обработке полной серии из 38 снимков (см. табл. 3), как и ожидалось, показал, что уголкового отражателя присутствовал менее чем на половине снимков; при обработке полной серии вблизи уголкового отражателя устойчиво отражающей площадки не выявлено (рис. 6, в).

Установка даже одного уголкового отражателя позволила заметно расширить область мониторинга; для получения более детальных оценок по площади целесообразна установка серии таких отражателей. Для отдельной идентификации расстояние между отражателями должно быть больше:

$$\Delta L = l_{res} \sqrt{2}, \quad (6)$$

где  $l_{res}$  – бо́льшая сторона ячейки разрешения. Для спутников *TerraSAR* размеры ячейки разрешения составляют порядка 3×3 м.

### Выводы

По результатам обработки радарных снимков *C*-диапазона с нисходящего трека спутника *ENVISAT* и снимков *X*-диапазона с восходящего трека спутников *TerraSAR* с использованием технологии устойчивых отражателей в программном пакете *StaMPS* для оползневого склона на участке Северокавказской железной дороги в районе пос. Грузинская Мамайка локализована зона повышенных скоростей смещений в направлении на спутник. Оценки истинных скоростей смещений с учетом рельефа склона и геометрии радарной съемки показали, что на отдельных участках средние скорости могут достигать 150 мм/год.

Проанализирована динамика оползневого процесса за десятилетие с 2003 по 2013 гг. Установлено, что изменение средних скоростей смещений за разные интервалы времени, для которых производились расчеты, не может быть обусловлено геометрией съемки, а, вероятнее всего, связано с динамикой оползневого процесса, которая отображается увеличением скорости смещений во времени. Установка уголкового отражателя позволила выполнить оценку скорости смещений на покрытой растительностью и лишенной естественных отражателей части склона.

Результаты выполненных работ продемонстрировали эффективность применения методов спутниковой радарной интерферометрии с использованием снимков *C*- и *X*-диапазонов в условиях Северного Кавказа как для решения задачи идентификации оползневых тел, так и для мониторинга изменения их подвижности во времени.

### Благодарности

Авторы признательны Европейскому космическому агентству (*ESA*) и Немецкому аэрокосмическому центру (*DLR*) за предоставление снимков в рамках проектов *C1P* № 7991 и *LAN-1247*.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 12-05-31127 мол\_а.

### Литература

- 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.
- 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. Т. 13, № 3. С.5–17.
- Михайлов В.О., Назарян А.Н., Смирнов В.Б., Диаман М., Шапиро Н., Киселева Е.А., Тихоцкий С.А., Поляков С.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П. Совместная интерпретация данных дифференциальной спутниковой интерферометрии и GPS на примере Алтайского (Чуйского) землетрясения 27.09.2003 г. // Физика Земли. 2010. № 2. С.3–16.
- Назарян А.Н., Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Тимошкина Е.П., Диаман М., Шапиро Н. Применение метода дифференциальной спутниковой интерферометрии для изучения деформаций земной поверхности на примере Алтайского землетрясения 27.09.2003 // Геофизика. 2008. № 5. С.69–75.
- 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. V. 113. B03403. doi: 10.1029/2007JB005063.
- Cakir Z., Armijo R., Chabaliere 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. V. 155. Issue 1. P.93–110. doi: 10.1046/j.1365-246X.2003-02001.x.
- Colesanti C., Wasowski J. Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry // Engineering Geology. 2006. V. 88. P.173–199.
- 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.
- Ferretti A., Prati, C. and Rocca, F. Permanent Scatterers in SAR Interferometry // IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 2001. V. 39(1). P.8–20.
- Foumelis 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.
- Geudtner D., Torres R., Snoeij P., Ostergaard A., Navas-Traver I., Rommen B., Brown M. Sentinel – 1 System Overview and Performance // Living Planet Symposium 2013, Edinburgh, UK. <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/849935.htm>
- Hooper A. A multi-temporal InSAR method incorporating both persistent scatterer and small baseline approaches // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. L. 16302. doi: 10.1029/2008GL034654.
- Hooper A., Segall P., Zebker H. Persistent Scatterer InSAR for Crustal Deformation Analysis, with Application to Volcán Alcedo, Galápagos // J. Geophys. Res. 2007. V. 112. B07407. doi: 10.1029/2006JB004763.
- 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. V. 31. L. 23611. doi: 10.1029/2004GL021737.
- Hooper A., Spaans K., Bekaert D., Cuenca M.C., Arikian M., Oyen A., StaMPS/MTI Manual // Delft Institute of Earth Observation and Space Systems Delft University of Technology, Kluyverweg 1, 2629 HS, Delft, The Netherlands, 2010. [http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/ StaMPS\\_Manual\\_v3.2.pdf](http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/ StaMPS_Manual_v3.2.pdf).
- Johan M., Niels R., Soren M. Three-dimensional glacial flow and surface elevation measured with radar interferometry // Nature. 1998. N 391. P.273–376.
- Kimura H., Yamaguchi Y. Detection of Landslide Areas Using Satellite Radar Interferometry // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2000. V. 66, N 3. P.337–344.
- 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. P.332–335. doi: 10.1109/IGARSS.2009.5417663.
- 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.

- Mikhailov V.O., Kiselyova E.A., 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.
- Mikhailov V., Kiseleva E., Smolyaninova E., Golubev V., Dmitriev P., Isaev Yu., Dorokhin K., Hooper A., Samiei-Esfahany S., Hanssen R.* PS-INSAR monitoring of landslides in the Great Caucasus, Russia, using ENVISAT, ALOS and TerraSAR-X SAR images // Abstract of ESA Living Planet Symposium, 9–13 September, 2013, Edinburgh, UK. <http://www.livingplanet2013.org/abstracts/848807.htm>
- Venkataraman G., Rao Y., Rao K.* Application of SAR Interferometry for Himalayan Glaciers // Proceedings of Fringe 2005 Workshop, 2005. <http://ebookbrowse.net/138-venkataraman-pdf-d530890460>.

#### Сведения об авторах

**МИХАЙЛОВ Валентин Олегович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [mikh@ifz.ru](mailto:mikh@ifz.ru)

**КИСЕЛЕВА Елена Алексеевна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [e.kiseleva@ifz.ru](mailto:e.kiseleva@ifz.ru)

**СМОЛЬЯНИНОВА Екатерина Ивановна** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [katsmol@mail.ru](mailto:katsmol@mail.ru)

**ДМИТРИЕВ Павел Николаевич** – инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [dmitrievpn@gmail.com](mailto:dmitrievpn@gmail.com)

**ГОЛУБЕВА Юлия Анатольевна** – аспирант, Московский физико-технический институт. 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., д. 9. Тел.: (985) 111-41-35. E-mail: [uma-mipt@mail.ru](mailto:uma-mipt@mail.ru)

**ИСАЕВ Юрий Сергеевич** – кандидат технических наук, начальник научно-исследовательского отдела, ОАО НИПИИ “Ленметрогипротранс”. 191002, Санкт-Петербург, Большая Московская ул., д. 2. E-mail: [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)

**ДОРОХИН Кирилл Александрович** – аспирант, научный сотрудник, ОАО НИПИИ “Ленметрогипротранс”. 191002, Санкт-Петербург, Большая Московская ул., д. 2. E-mail: [lmgt@lenmetro.ru](mailto:lmgt@lenmetro.ru)

**ТИМОШКИНА Елена Павловна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [mikh@ifz.ru](mailto:mikh@ifz.ru)

**ХАЙРЕТДИНОВ Станислав Ахмедович** – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77.

**ГОЛУБЕВ Василий Иванович** – инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: (495) 254-85-77. E-mail: [w.golubev@mail.ru](mailto:w.golubev@mail.ru)

## LANDSLIDE MONITORING AT THE NORTH CAUCASUS RAIL ROAD USING SAR DATA OF DIFFERENT WAVELENGTH AND CORNER REFLECTOR

V.O. Mikhailov<sup>1</sup>, E.A. Kiseleva<sup>1</sup>, E.I. Smolyaninova<sup>1</sup>, P.N. Dmitriev<sup>1</sup>,  
Yu.A. Golubeva<sup>2</sup>, Yu.S. Isaev<sup>3</sup>, K.A. Dorokhin<sup>3</sup>, E.P. Timoshkina<sup>1</sup>,  
S.A. Khairetdinov<sup>1</sup>, V.I. Golubev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>2</sup>*Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudni, Russia*

<sup>3</sup>*"Lenmetrogiprotrans", St. Petersburg, Russia*

**Abstract.** In the present paper displacements of the landslide slope in the Tuapse-Adler section of the North Caucasus railroad during ten years period from July 2003 to May 2013 were estimated by means of SAR interferometry. PS-INSAR method was used to analyze dynamics of velocity of displacements of different parts of the landslide. We incorporated 38 images from descending 35D acquisitions of the Envisat satellite (C-band, wavelength 5.6 cm) covering three time periods: 2003–2006, 2007–2010, 2010–2012 and 38 images from ascending 54A acquisitions of TerraSAR-X и TanDEM-X satellites (X-band, wavelength 3.1 cm) for two time periods: 2011–2012 and 2012–2013. As a result we localized several active areas where mean velocities of displacements in satellite line-of-sight (LOS) direction exceed 40 mm/year. Mean velocity values for the above-mentioned time periods are different. We demonstrated that these variations cannot be attributed to different geometry of acquisitions of satellites, but, most likely, reflect dynamics of the landslide activity.

We established parameters of the artificial reflector which was mounted in November 2012 in the landslide area where lack of persistent scatterers of radar signal was observed. Mean velocity value in the LOS direction for the artificial reflector was estimated as 49.5 mm/year. Installation of the artificial reflector permitted us to extend the area of monitoring incorporating the area covered by thick vegetation where no persistent scatterers had been identified before.

The obtained results demonstrate efficiency of C and X-band SAR interferometry in the Northern Caucasus for both localization of landslide bodies and monitoring their activity.

**Keywords:** synthetic aperture radar, interferometry, satellite monitoring, landslides, corner reflector.