

## **Выделение пар устойчивых отражателей на спутниковых снимках с использованием информации о рельефе местности<sup>1</sup>**

А.А. Адуенко, А.С. Василейский, Е.А. Карацуба, А.И. Карелов, И.А. Рейер, К.В. Рудаков,  
В.В. Стрижов

**Аннотация.** Эффективный контроль геодинамических процессов с использованием многократной радиолокационной спутниковой съемки и дифференциальной интерферометрической обработки получаемых данных требует выявления участков местности, сохраняющих приемлемый уровень когерентности на снимках в течение длительного интервала времени. Анализ фазовой компоненты снимков для таких участков, называемых устойчивыми отражателями радиолокационного сигнала, позволяет оценивать величины малых (со скоростями до единиц сантиметров в год и менее) смещений наблюдаемой поверхности. В работе рассмотрены два метода радиолокационной дифференциальной интерферометрии, основанные на выявлении устойчивых отражателей: известный метод устойчивых отражателей и предложенная модификация метода, основанного на использовании пар устойчивых отражателей. Предлагается при их использовании не проводить непосредственную развертку фазы, представляющую наибольшую сложность при использовании большинства известных методов. Для метода пар устойчивых отражателей квадратичный штраф предлагается применять не для развертки фазы, а на конечном этапе обработки для восстановления абсолютных величин смещений и поправок априорной высотной модели по полученным относительным значениям. Применение рассматриваемых алгоритмов проиллюстрировано на примере обработки интерферометрической цепочки из 35 снимков, полученных системой COSMO-SkyMed.

**Ключевые слова:** SAR-интерферометрия, устойчивые отражатели, метод пар устойчивых отражателей, цифровая модель рельефа, развертка фазы

### **Введение**

Методы спутникового дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) находят все большее применение при исследовании опасных геологических процессов и явлений [1]. Наибольшее развитие в данной сфере в последние десятилетия получили методы изучения малых движений земной поверхности вследствие воздействия естественных и техногенных факторов с использованием данных радиолокационной (РЛ) спутниковой съемки [1], осуществляемой радаром с синтезированной апертурой (РСА, англ. *SAR - Synthetic Aperture Radar*) [2; 3].

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 17-20-02222, 16-07-01172, 16-37-00111)

Многочисленные исследования последних лет демонстрируют возможность успешного решения задач мониторинга опасных геодинамических воздействий различного генеза с использованием метода SAR-интерферометрии, в частности, оползневых процессов [4; 5], городской застройки на неустойчивых грунтах [6], территорий разработки нефтегазовых месторождений [7], объектов транспортного комплекса в сложных инженерно-геологических условиях [1; 8] и др. Комплексирование методов SAR-интерферометрии с традиционными методами мониторинга геодинамики позволяет создавать детальные карты деформаций земной поверхности с относительно малыми скоростями (вплоть до единиц сантиметров в год и менее) по обширным территориям, потенциально подверженным опасным геодинамическим воздействиям [6; 8; 7], а также осуществлять периодический контроль развития опасных процессов. Своевременное обнаружение потенциально опасных геодинамических воздействий на объекты транспортной инфраструктуры, топливно-энергетического комплекса, жилой и промышленной застройки и реализация адекватных мер инженерной защиты зачастую позволяет предотвратить разрушение объектов или минимизировать ущерб. Актуальность разработки эффективных методов интерферометрической обработки данных радиолокационной съемки дополнительно обусловлена тем, что в соответствии с действующей Концепцией развития космической системы ДЗЗ в России на период до 2025 г. запланировано создание и ввод в эксплуатацию ряда отечественных спутников, оснащенных бортовыми РЛ комплексами, в том числе функционирующими в X-диапазоне частот [9].

Основным принципом спутниковой SAR-интерферометрии является совместная обработка амплитудной и фазовой компонент отраженного от земной поверхности РЛ сигнала, регистрируемого бортовой аппаратурой спутника в разные моменты времени [2; 3]. При существенном различии положения спутника на орбите при регистрации РЛ снимков последующая интерферометрическая обработка позволяет построить модель рельефа снимаемой территории [10]. Дифференциальная РЛ интерферометрия (DInSAR) позволяет оценивать смещения наблюдаемой поверхности за время между несколькими съемками (съемка при этом должна осуществляться из практически совпадающих положений на орбите). Для обеспечения достоверной оценки движений наблюдаемой поверхности с высокой точностью производится многократная съемка на протяжении длительного временного интервала с формированием так называемой интерферометрической цепочки снимков [2].

В силу того, что характеристики большинства природных объектов (например, влажность, шероховатость и конфигурация поверхности), определяющие степень поглощения или свойства рассеивания РЛ сигнала, существенно меняются со временем, только небольшая доля

элементов РЛ снимков интерферометрической цепочки демонстрирует временную когерентность, позволяя анализировать изменения фазы зарегистрированного сигнала. Соответствующие участки изучаемой сцены (а также их отображения на цепочке РЛ снимков) называют устойчивыми отражателями радиолокационного сигнала (англ. *PS – Persistent Scatterer*). Устойчивыми отражателями на практике часто являются элементы жилой и промышленной застройки, сооружения и объекты транспортной инфраструктуры, а также участки земной поверхности, лишенные растительности. В силу постоянной изменчивости участки зеленых насаждений, леса, водной поверхности являются слабо когерентными, особенно при съемке в коротковолновом X-диапазоне [11]. Это затрудняет выделение устойчивых отражателей при РЛ съемке естественных ландшафтов. В то же время, большинство практических применений SAR-интерферометрии требует выявления по возможности большего числа устойчивых отражателей для построения детальных карт смещений наблюдаемой поверхности [6; 4; 8; 5].

Фазовая компонента регистрируемого РСА сигнала подвержена существенным искажениям, вызываемым влиянием атмосферы, в частности изменением концентрации водяного пара. При разновременной РЛ съемке данные искажения могут считаться некоррелированными во времени и существенно коррелированными в пространстве. Поэтому методы SAR-интерферометрии с устойчивыми отражателями (PS-InSAR) в большинстве случаев требуют большого набора (обычно не менее 30) РЛ снимков, полученных в разное время, для надежного выделения устойчивых отражателей. Для выделения устойчивых отражателей традиционно используется предложенный в работе [12] метод, предусматривающий построение физической модели регистрируемого РЛ сигнала и его вероятностной модели для устойчивых отражателей. Предполагается, что дисперсию фазы сигнала, являющуюся мерой устойчивости отражателя, можно оценить по дисперсии амплитуды и ее среднему значению. Метод, описанный в [12], применяется в данной работе как для поиска устойчивых отражателей для стандартного метода PS-InSAR, так и для поиска кандидатов в устойчивые отражатели для предложенной модификации метода пар устойчивых отражателей.

Метод, основанный на анализе пар устойчивых отражателей (англ. *PSP – Persistent Scatterer Pairs*), впервые описанный в [13], считается более устойчивым, чем стандартный метод PS-InSAR [12], поскольку использует связи между близко расположенными элементами РЛ снимков. Такой подход позволяет учесть схожесть характера влияния атмосферы на фазовую компоненту сигнала от соседних участков сцены. Метод PSP также позволяет выявлять и оценивать смещения элементов РЛ изображения, характеризующихся относительно небольшой

когерентностью. В силу этого в результате обработки методом PSP формируется более плотная по сравнению со стандартным методом PS-InSAR сеть устойчивых отражателей [13] и более детальная карта, позволяющая характеризовать скорости наблюдаемых смещений поверхности. Однако в ряде случаев, например, при наблюдении зон оползневых процессов на сильно пересеченной местности, недостатком метода PSP можно считать присущую ему большую гладкость получаемого решения по сравнению со стандартным методом PS-InSAR. Методы SAR-интерферометрии позволяют регистрировать смещения участка земной поверхности только в проекции на линию наблюдения LOS (англ. *Line Of Sight*) этого участка с космического аппарата. При наблюдении оползневых процессов направления смещения грунтовых масс и наземных объектов на склонах могут существенно различаться для соседних участков, что приводит к существенным различиям регистрируемых методами SAR-интерферометрии проекций смещений на LOS. Кроме того, метод PSP характеризуется достаточно большими вычислительными затратами на его реализацию, связанными с необходимостью итерационного построения графа устойчивых отражателей, демонстрирующих согласованную динамику.

Дополнительно после определения параметров модели из шумовых составляющих в фазе можно выделить атмосферную составляющую [10], которая позволяет скомпенсировать соответствующие воздействия и оценить наблюдаемые смещения поверхности, в том числе, нелинейные [13].

На практике ключевой проблемой SAR-интерферометрии является необходимость корректной развертки фазы (или разности фаз) сигнала, первоначально регистрируемого по модулю  $2\pi$ , с устранением соответствующей неоднозначности. Применение обоих рассматриваемых в работе методов обычно предусматривает развертку фазы с  $l_2$  или  $l_1$  штрафом. В данной работе предлагается не проводить непосредственно развертку фазы. Для метода PSP вместо этого предлагается производить оценку абсолютных параметров (скоростей движения отражателей в проекции на LOS и высот) по их относительным значениям с помощью минимизации  $l_2$  штрафа [14].

Для апробации рассматриваемых методов использован набор из 35 РЛ снимков, полученных спутниковой системой COSMO-SkyMed в режиме STRIPMAP [10]. Из имевшихся снимков интерферометрической цепочки были вырезаны фрагменты, охватывающие территорию размером  $5 \times 5$  км. Для совмещения разновременных РЛ снимков использовался метод, подробно описанный в [15], предусматривающий применение детектора Харриса [16], дескриптора SIFT [17] и алгоритма сопоставления точек изображений FLANN [18].



### **Постановка задачи выделения устойчивых отражателей**

Заданы  $K + 1$  формирующих интерферометрическую цепочку РЛ изображений - матриц размера  $m \times n$  амплитудных компонент  $Z$  и фазовых компонент  $\Phi$ . Элементы матриц удовлетворяют соотношениям  $z_{xy}^q \in \mathbf{R}_+$ ,  $\varphi_{xy}^q \in [-\pi, \pi]$ . Для обеспечения возможности интерферометрической обработки исходные РЛ изображения подвергнуты предварительному совмещению. Каждое  $q$ -ое изображение характеризуется временем съемки  $t_q$ , а также положением спутника на орбите в момент съемки. Требуется построить отображение  $g : (x, y) \in [1, \dots, m] \times [1, \dots, n] \mapsto \{0, 1\}$ , где 1 соответствует устойчивому отражателю РЛ сигнала, а 0 - остальным элементам изображений.

### **Влияние параметров орбиты спутника**

Основным принципом SAR-интерферометрии является совместная обработка нескольких РЛ снимков исследуемой территории в разные моменты времени из незначительно отличающихся положений спутника на орбите. Пусть среди  $K + 1$  снимков снимок с номером  $M$  выбран в качестве опорного. Для дальнейшего анализа можно охарактеризовать каждый из оставшихся снимков следующими параметрами: временной базой по отношению ко времени регистрации опорного снимка  $T_q = t_q - t_M$  и пространственной базой  $B_q$ . Данные параметры оказывают существенное влияние на возможность интерферометрической обработки снимков, определяя, в конечном счете, чувствительность метода [8]. Пространственная база рассчитывается как среднее расстояние между плоскостями орбит спутников или фрагментов орбиты одного спутника при пролете над территорией во время съемки. При этом знак пространственной базы принимается положительным, если положение спутника на  $q$ -ой орбите в среднем дальше от регистрируемой сцены, чем при съемке опорного РЛ изображения. Среднее расстояние необходимо использовать из-за отсутствия строгой параллельности орбитальных плоскостей в силу вариации орбитальных параметров. Для удобства записи в дальнейшем под обозначением  $B_q$  подразумевается составляющая пространственной базы, перпендикулярная направлению LOS.

В качестве опорного используется снимок, соответствующий приемлемому компромиссу минимизации временной базы  $T_q$  и перпендикулярной составляющей пространственной базы  $B_q$  используемых РЛ снимков интерферометрической цепочки [19].

### **Модель фазовой компоненты сигнала**

Фаза регистрируемого бортовой РСА аппаратурой сигнала определяется в первую очередь расстоянием от спутника до соответствующего участка местности. Разность же фаз сигналов,

зарегистрированных от одного участка местности в разные моменты времени из несколько отличающихся положений на орбите, зависит от высоты  $h$  участка местности над уровнем моря, относительного смещения участка  $d$  вдоль направления LOS и от положения участка на регистрируемой сцене, определяющего расстояние  $S$  от него до спутника в момент регистрации опорного РЛ снимка. Априорные значения высот участков территории  $h_{xy}$  могут быть получены путем передискретизации цифровой модели рельефа (ЦМР), обычно обладающей существенно меньшим пространственным разрешением по сравнению с РЛ снимками.

С учетом введенных определений временной базы и составляющей пространственной базы, перпендикулярной направлению LOS, имеем следующую модель для разности фазовых компонент РЛ сигнала:

$$\Phi_q - \Phi_M = \frac{4\pi B_q}{\lambda R \sin \theta} \mathbf{H} + \frac{4\pi B_q}{\lambda R \operatorname{tg} \theta} \mathbf{S} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_q + \Delta\Phi_q^{\text{atm}} + \Delta\Phi_q^{\text{noi}}, \quad (1)$$

где  $\Phi_q^{\text{atm}}$  - отклонения фазы, связанные с влиянием атмосферы, а  $\Delta\Phi_q^{\text{noi}}$  - шумовая составляющая,  $\mathbf{S}$  - матрица расстояний от участков местности до спутника в момент регистрации опорного РЛ снимка,  $\mathbf{V}$  - матрица скоростей смещения объектов на местности в проекции на направление LOS,  $\mathbf{H}$  - матрица высот для снимаемой территории,  $\theta$  - угол визирования при съемке сцены,  $R$  - среднее расстояние от спутника до сцены ( $R = H_{\text{orb}} / \cos \theta$ ,  $H_{\text{orb}}$  - высота орбиты спутника),  $\lambda$  - длина волны зондирующего РЛ сигнала. Равенство (1) справедливо для полной фазы. Так как матрицы  $\Phi_q$  содержат значения фазы по модулю  $2\pi$  равенство (1) нужно понимать по модулю  $2\pi$ , как и все последующие. Для упрощения записи указание на это в дальнейшем опущено.

#### **Временная когерентность точек снимков**

Используя соотношение (1) произведем вычитание из фазы каждого снимка составляющей, связанной с высотой участков местности  $\mathbf{H}$  и положением спутника при регистрации опорного снимка. Сохраним для получившихся матриц обозначение  $\Phi_q$ . Получим следующую модель для разности фазовых компонент сигнала:

$$\Phi_q^{\text{rel}} = \Phi_q - \Phi_M = \frac{4\pi B_q}{\lambda R \sin \theta} \Delta\mathbf{H} + \frac{4\pi}{\lambda} \mathbf{V} T_q + \Delta\Phi_q^{\text{atm}} + \Delta\Phi_q^{\text{noi}}. \quad (2)$$

В (2) присутствует матрица  $\Delta \mathbf{H}$ , характеризующая ошибки используемой ЦМР, а также ошибки, в том числе связанные с тем, что шаг ее дискретизации зачастую существенно превышает пространственное разрешение РЛ снимков.

Рассмотрим произвольный элемент снимка с координатами  $(x, y)$ . Предположим, что скорость смещения соответствующего участка в проекции на направление наблюдения  $v_{xy}$  и ошибка по высоте  $\Delta h_{xy}$  определены. Тогда в качестве меры временной когерентности для этого элемента примем:

$$c_{xy} = \left| \frac{\sum_{q \neq M} \exp[j(\varphi_q^{xy} - 4\pi v_{xy} T_q / \lambda - 4\pi B_q \Delta h_{xy} / (\lambda R \sin \theta))]}{K} \right|. \quad (3)$$

Отметим, что  $0 \leq c_{xy} \leq 1$ , причем  $c_{xy} = 1$  тогда и только тогда, когда изменение фазы сигнала полностью объясняется линейным движением соответствующего участка вдоль направления LOS и наличием некоторой ошибки в используемой ЦМР.

#### Алгоритм выделения устойчивых отражателей

Пусть  $\bar{\mathbf{Z}}$  есть нормированное амплитудное изображение, то есть:

$$\bar{\mathbf{Z}} = \frac{1}{K+1} \sum_{q=1}^{K+1} \mathbf{Z}_q / \bar{z}_q, \text{ где } \bar{z}_q = \frac{1}{mn} \sum_i^n \sum_j^m z_{xy}^q.$$

Для каждого элемента снимков вычислим оценку дисперсии амплитуды

$$\mathbf{D} = \frac{1}{K} \sum_{q=1}^{K+1} [(\mathbf{Z}_q / \bar{z}_q - \bar{\mathbf{Z}}) \times (\mathbf{Z}_q / \bar{z}_q - \bar{\mathbf{Z}})]$$

где  $\times$  означает поэлементное умножение. Установим два пороговых значения  $\gamma_1 \geq 1$  и  $\gamma_2 > 0$ . Элемент изображения  $(x, y)$  будем считать устойчивым отражателем, если выполняются два следующих условия:

$$\bar{z}_{xy} \geq \gamma_1 \text{ и } \frac{\sqrt{d_{xy}}}{\bar{z}_{xy}} \leq \gamma_2. \quad (4)$$

Количество выделяемых таким образом устойчивых отражателей снижается при увеличении  $\gamma_1$  и уменьшении  $\gamma_2$ . Если установить  $\gamma_1 = 0$ , то выбранный набор устойчивых отражателей совпадет с набором, полученным методом PS-InSAR [12] при том же  $\gamma_2$ . При известных матрицах  $\mathbf{V}$  и  $\Delta \mathbf{H}$  при одинаковом количестве выделенных устойчивых отражателей описанные методы будем сравнивать по средней когерентности (3) этих отражателей.

Описанный метод будем использовать для нахождения кандидатов в устойчивые отражатели. Опишем далее метод оценки матриц скоростей смещения  $\mathbf{V}$  и ошибок по высоте  $\Delta\mathbf{H}$ .

### Метод устойчивых отражателей для оценки скоростей смещения и ошибок по высоте без развертки фазы

Будем оценивать матрицы  $\mathbf{V}$  и  $\Delta\mathbf{H}$  поэлементно, без учета возможных зависимостей между соседними элементами изображений. Такой подход соответствует стандартному методу PS-InSAR. Для элемента  $(x, y)$  снимков величины  $v_{xy}$  и  $\Delta h_{xy}$  найдем путем решения задачи максимизации временной когерентности (3) для этого элемента:

$$[v_{xy}, \Delta h_{xy}] = \operatorname{argmax}_{c_{xy}}(v_{xy}, \Delta h_{xy}).$$

Элемент  $(x, y)$  считаем устойчивым отражателем, если полученное значение временной когерентности не ниже предварительно заданного порога  $c_{xy} \geq \beta_1$ .

### Метод пар устойчивых отражателей для оценки скоростей смещения и ошибок по высоте без развертки фазы

Метод PSP, первоначально предложенный в работе [13], основан на анализе пар близких элементов изображений, являющихся кандидатами в устойчивые отражатели. За счет близости элементов и соответствующих им участков местности удастся уменьшить атмосферное влияние на разность фаз, так как для близких элементов это влияние почти совпадает. В силу этого можно выделить больше устойчивых отражателей, так как метод позволяет учесть и их частичную когерентность.

Имея набор  $P$  элементов-кандидатов в устойчивые отражатели, соединим все элементы из  $P$  ребрами и рассмотрим произвольное ребро  $e$ , соединяющее некоторые элементы  $p_1(x_1, y_1)$  и  $p_2(x_2, y_2)$ . Тогда для разности фаз элементов  $p_1(x_1, y_1)$  и  $p_2(x_2, y_2)$  для  $q$ -го снимка имеем:

$$\begin{aligned} \varphi_q^{\text{rel}}(p_1, p_2) &= \left( \varphi_{x_1 y_1}^q - \varphi_{x_1 y_1}^M \right) - \left( \varphi_{x_2 y_2}^q - \varphi_{x_2 y_2}^M \right) = \\ &= \frac{4\pi B_q}{\lambda R \sin \theta} (h_{x_1 y_1} - h_{x_2 y_2}) + \frac{4\pi}{\lambda} (v_{x_1 y_1} - v_{x_2 y_2}) T_q + (\varphi_q^{\text{atm}}(p_1) - \varphi_q^{\text{atm}}(p_2)) + (\varphi_q^{\text{noi}}(p_1) - \varphi_q^{\text{noi}}(p_2)), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $v_{x_1 y_1} - v_{x_2 y_2}$  разность скоростей смещения элементов  $p_1$  и  $p_2$  в проекции на направление LOS, а  $h_{x_1 y_1} - h_{x_2 y_2}$  - разность в ошибках высот используемой модели рельефа для этих элементов (так как уже произведен учет рельефа местности в фазовой составляющей сигнала). Из (4) заключаем: если оба элемента  $p_1$  и  $p_2$  являются устойчивыми отражателями и

располагаются достаточно близко друг от друга на изображении, то  $\varphi_q^{\text{atm}}(p_1) - \varphi_q^{\text{atm}}(p_2)$  мало в силу значительной схожести влияния атмосферных явлений на небольшом расстоянии, а  $\varphi_q^{\text{noi}}(p_1), \varphi_q^{\text{noi}}(p_2)$  малы, так как рассматриваемые элементы являются устойчивыми отражателями. Определим временную когерентность ребра  $e$ , соединяющего некоторые элементы  $p_1$  и  $p_2$ , как

$$c(p_1, p_2) = \left| \frac{\sum_{q \neq M} \exp[j\varphi_q^{\text{rel}}(p_1, p_2)]}{K} \right|. \quad (6)$$

При этом параметры  $\Delta v(p_1, p_2) = v_{x_1 y_1} - v_{x_2 y_2}$  и  $\Delta h(p_1, p_2) = h_{x_1 y_1} - h_{x_2 y_2}$  определяются из решения задачи максимизации временной когерентности ребра  $e$ , соединяющего элементы  $p_1$  и  $p_2$ :

$$[\Delta v(p_1, p_2), \Delta h(p_1, p_2)] = \text{argmax } c(p_1, p_2)(\Delta v(p_1, p_2), \Delta h(p_1, p_2)). \quad (7)$$

Заметим, что если рассмотреть, например, три элемента  $p_1, p_2, p_3$ , то определенные из (7) параметры в общем случае не удовлетворяют соотношениям:

$$\Delta v(p_1, p_2) + \Delta v(p_2, p_3) + \Delta v(p_3, p_1) = 0 \quad (8)$$

и

$$\Delta h(p_1, p_2) + \Delta h(p_2, p_3) + \Delta h(p_3, p_1) = 0. \quad (9)$$

Традиционно для обеспечения соответствия этим соотношениям, решают задачу развертки фазы с  $l_1$  или  $l_2$  штрафом по отклонению фазы [2]. В настоящей работе предложена модификация метода PSP без развертки фазы, но с последующей обработкой, чтобы удовлетворить соотношениям (8) и (9).

Пусть заданы четыре параметра  $\beta, d_1, d_2, r$ . Пусть также имеется некоторый набор элементов  $P_0$  и множество ребер  $E_0$  между ними. Про элементы  $P_0$  известно, что они являются устойчивыми отражателями из набора  $P \supseteq P_0$  кандидатов в устойчивые отражатели. Набор  $P_0$  должен с одной стороны содержать только элементы, соответствующие устойчивым отражателям, а с другой - содержать хотя бы по одному элементу из каждой группы устойчивых отражателей, пространственно разнесенных по изображению. Набор устойчивых отражателей называется группой, если граф, построенный на этих элементах, связный и длина всех его ребер не превышает  $r$ . Отсюда следует, что разные группы устойчивых отражателей

находятся на расстоянии большем, чем  $r$ . Множество  $E_0$  включает ребра, соединяющие точки  $p_1, p_2$  из  $P_0$ , длина которых не более  $r$  и  $c(p_1, p_2) \geq \beta$ . Введем также векторы принятых ( $g$ ) и непринятых ( $b$ ) ребер размера  $P$ , которые исходно считаем нулевыми.

Построение согласованного набора устойчивых отражателей осуществляется в соответствии со следующим итерационным алгоритмом. На каждой следующей итерации с номером  $i \geq 1$  делаем следующее. Рассматриваем кратчайшее ребро  $e$  между элементами  $p_1 \in P_{i-1}$  и  $p_2 \in P \setminus P_{i-1}$ . Если такого ребра не существует, или его длина превышает  $r$ , алгоритм завершает свою работу. Иначе вычисляем  $c(p_1, p_2)$ . Если  $c(p_1, p_2) \geq \beta$ , то добавляем ребро в множество принятых  $E_i = E_{i-1} \cup \{e\}$  и увеличиваем количество принятых ребер для элемента  $p_2$ :  $g(p_2) \rightarrow g(p_2) + 1$ . Если при этом  $g(p_2) \geq d_1$ , добавляем элемент  $p_2$  в множество  $P_i$ :  $P_i = P_{i-1} \cup \{p_2\}$ . Если  $c(p_1, p_2) < \beta$ , увеличиваем для элемента  $p_2$  количество непринятых ребер,  $b(p_2) \rightarrow b(p_2) + 1$ . Если при этом  $b(p_2) \geq d_2$ , исключаем  $p_2$  из множества кандидатов в устойчивые отражатели,  $P \rightarrow P \setminus \{p_2\}$ . Итерации продолжаем до остановки алгоритма.

По завершении работы алгоритма имеем множества  $P_f$  и  $E_f$ . Исключим из  $E_f$  ребра, один из концов которых не принадлежит  $P_f$ . Далее исключим из  $P_f$  все изолированные элементы. Полученный в итоге граф  $(P_f, E_f)$  назовем графом устойчивых отражателей. Заметим, что каждой дуге  $e$  этого графа, соединяющей элементы  $p_1$  и  $p_2$ , соответствуют  $c(p_1, p_2), \Delta h(p_1, p_2), \Delta v(p_1, p_2)$ . Если граф устойчивых отражателей имеет циклы, то вообще говоря возникает нарушение тождеств (8) и (9) для некоторых  $p_1, p_2, p_3 \in P_f$ . Поэтому далее опишем, как для каждой точки  $p \in P_f$  найти  $v(p)$  и  $h(p)$ , чтобы от разностей перейти к абсолютным величинам. Отметим, что получаемые в процессе обработки РЛ снимков оценки ошибок по высоте позволяют уточнить значения высот для участков, являющихся устойчивыми отражателями, и зачастую могут считаться, по сути, поправками априорной высотной модели (за исключением высотных объектов).

### **Восстановление абсолютных значений скоростей смещения устойчивых отражателей и поправок модели рельефа по графу устойчивых отражателей**

Для восстановления абсолютных значений скоростей смещения устойчивых отражателей в проекции на LOS и поправок априорной высотной модели по графу устойчивых отражателей воспользуемся методом наименьших квадратов. Опишем, как определить абсолютные скорости

движения отражателей. Определение абсолютных значений поправок высотной модели полностью аналогично. Имеем наблюдаемый вектор  $v$  размера  $|E_f|$  относительных скоростей устойчивых отражателей. Искомым вектором параметров  $w$  размера  $|P_f|$  является вектор абсолютных скоростей смещения. Добавим условие нулевого значения средней скорости смещения (строго говоря, скорости смещения методами SAR-интерферометрии определимы с точностью до константы). Тогда модель приобретает вид:

$$\begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} = Aw + \varepsilon ,$$

где первая строка  $A$  состоит из единиц и соответствует условию нулевого значения средней скорости смещения. В последующих строках  $A$  для каждого ребра  $e \in E_f$ , соединяющего элементы  $p_1$  и  $p_2$ , содержится 1 в столбце, соответствующем  $p_1$ , и -1 в столбце, соответствующем  $p_2$ . Решение указанной системы  $\hat{w}$  дает оценку скоростей смещения выявленных устойчивых отражателей в проекции на LOS.

Предложенный метод имеет временную сложность  $O((K+1)mn + |P|^2)$ . Здесь первая слагаемое соответствует выделению множеств  $P$  и  $P_0$  кандидатов в устойчивые отражатели путем проверки выполнения соотношений (4). Второе слагаемое соответствует алгоритму выделения пар устойчивых отражателей с помощью приведенного итеративного алгоритма, начиная от набора точек  $P_0$ , путем перебора точек из набора кандидатов в устойчивые отражатели  $P$ , а также получению абсолютных значений скоростей смещения устойчивых отражателей и поправок модели рельефа по графу устойчивых отражателей.

### Вычислительный эксперимент

В вычислительном эксперименте стандартный метод PS-InSAR и предложенная модификация метода PSP сравнивались на примере обработки набора из 35 РЛ снимков в режиме STRIPMAP территории в Хостинском районе г. Сочи размером  $5 \times 5$  км. Исходная интерферометрическая цепочка РЛ снимков с 22.08.2010 по 3.04.2011 получена спутниковой системой COSMO-SkyMed (© ASI, 2010-2011. All rights reserved. Distributed by e-GEOS) в ходе работ по мониторингу потенциально опасных воздействий на объекты железнодорожной инфраструктуры. Данный проект выполнялся на участке Туапсе-Адлер Северо-Кавказской железной дороги компанией e-GEOS и ОАО «НИИАС» в рамках программы международного научно-технического сотрудничества ОАО «РЖД» и корпорации «Финмеканика» [8]. Предварительная обработка данных, направленная на совмещение формирующих

интерферометрическую цепочку разновременных РЛ снимков, проведена в соответствии с методом, подробно описанным в [15].

На рис. 1 приведены примеры амплитудной (а) и фазовой компонент (б) одного из РЛ снимков интерферометрической цепочки, а также использовавшаяся при обработке априорная высотная модель (в) и пример разности фаз  $\varphi_q^{\text{rel}}$  одного из снимков и опорного снимка после учета рельефа и положения спутника в момент съемки (г). Высотная модель на рис.1.в приведена в псевдоцветовом отображении (значения шкалы показаны в метрах). Значения фаз на рис.1.б и рис.1.г также приведены в псевдоцветовом отображении. Отметим, что фазовая компонента исходного РЛ снимка и относительная фаза имеют вид псевдошумового поля (в том числе и в силу того, что значения фаз представляются по модулю  $2\pi$ ).

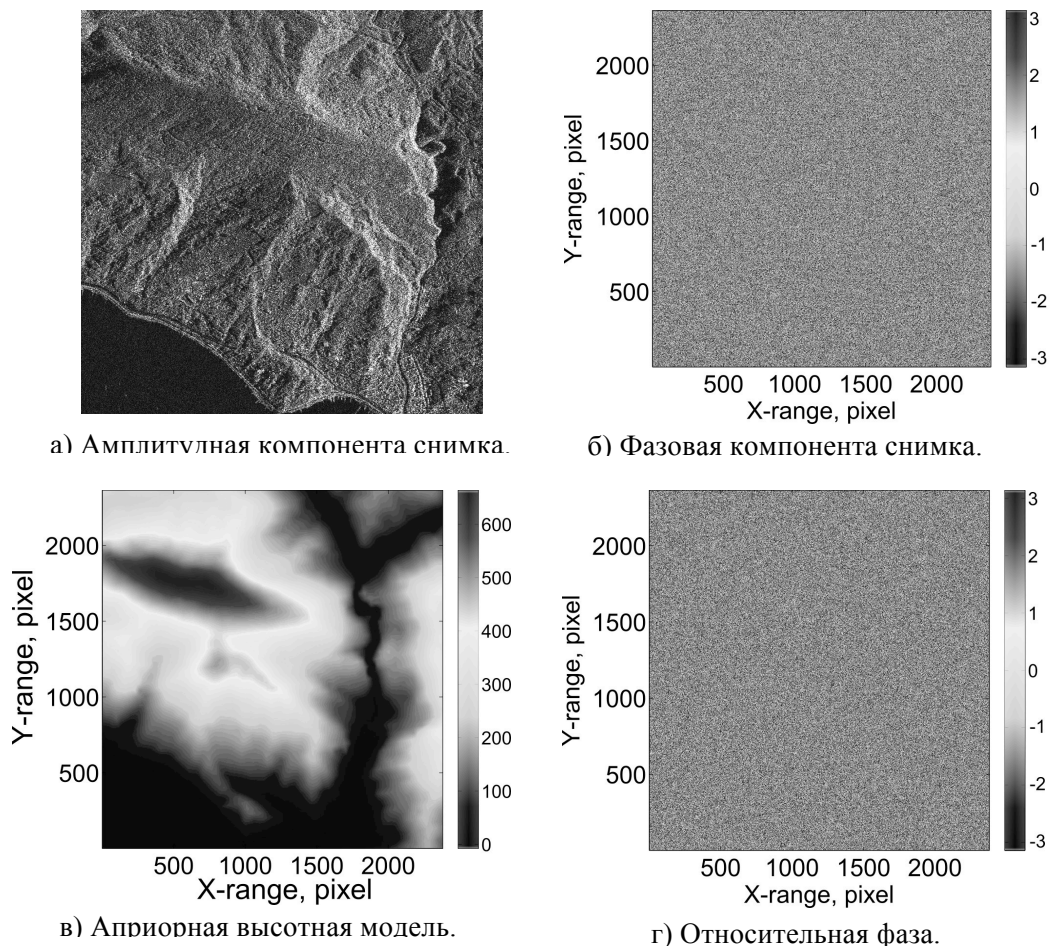


Рис. 1. Пример исходного снимка, априорная высотная модель и пример разности фаз после учета рельефа и положения спутника.

В качестве априорной высотной модели для обработки использовались данные свободно распространяемой ЦМР SRTM [20], соответствующий фрагмент которой был загружен из сети



Internet по адресу <http://www.viewfinderpanoramas.org/dem3.html#3dem>. Отметим, что использовавшаяся ЦМР SRTM имеет разрешение  $3'' \times 3''$ , что соответствует для рассматриваемого участка местности 67,6 м по широте и 92,43 м по долготе. При этом пространственное разрешение РЛ снимков системы COSMO-SkyMed в режиме STRIPMAP составляет 3 м [10]. Так как ЦМР имеет разрешение на порядок ниже, чем пространственное разрешение РЛ снимков, привязка модели рельефа к снимкам осуществлялась по орбитальным данным. Точность привязки в таком случае составляет 2-3 элемента разрешения РЛ снимков, что гораздо меньше разрешения ЦМР.

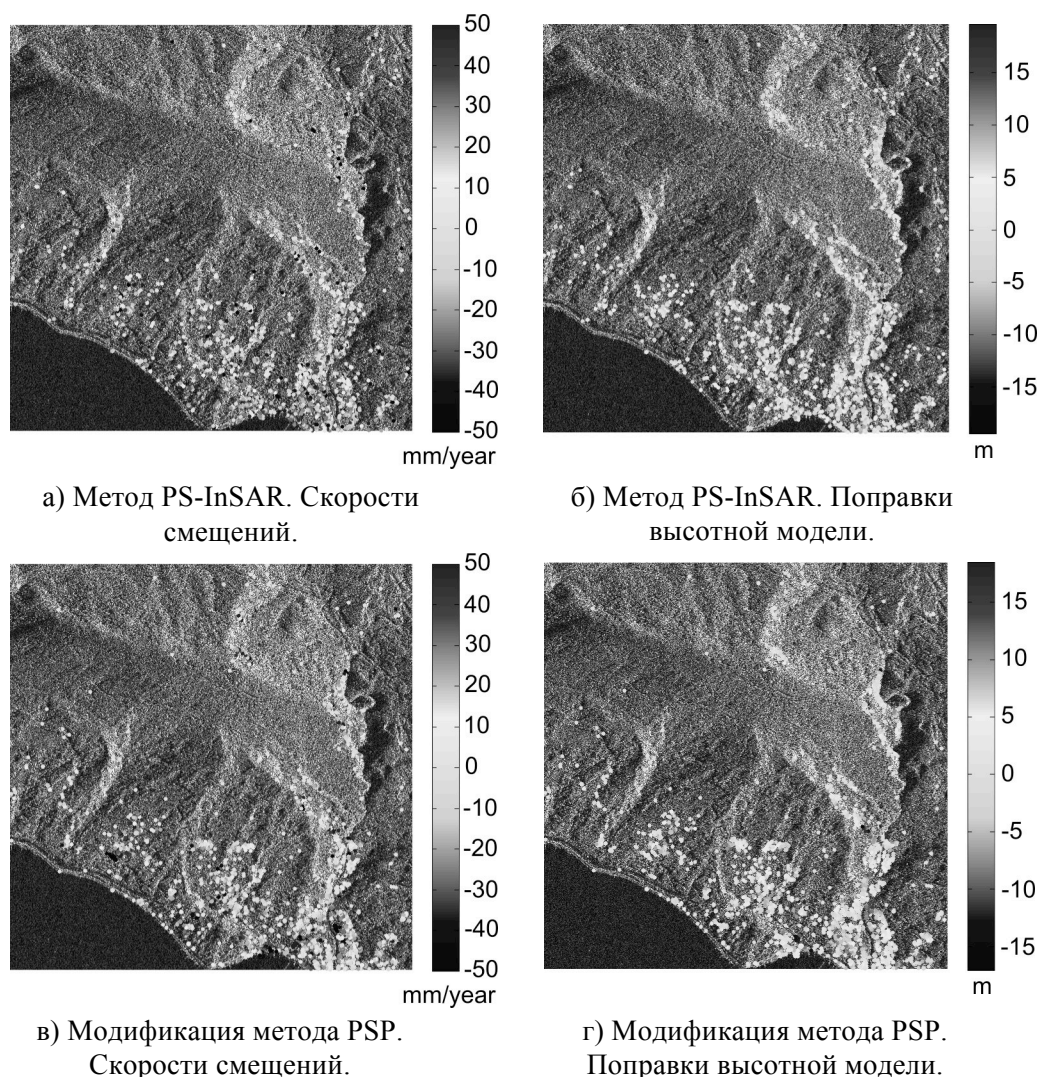


Рис. 2. Сравнение результатов интерферометрической обработки РЛ снимков (скорости смещений и поправки высотной модели) для метода PS-InSAR и модификации метода PSP.

Обработка интерферометрической цепочки РЛ снимков осуществлялась в соответствии с описанными выше стандартным методом PS-InSAR и предложенной модификацией метода

PSP. Для обоих методов выбраны значения  $\beta = \beta_1 = 2/3$ , то есть требования к качеству устойчивого отражателя по временной когерентности для метода PS-InSAR и к ребру, соединяющему устойчивые отражатели, для модификации метода PSP одинаковы. Для дальнейшей обработки выбраны пороговые значения  $r = 40$ ,  $d_1 = d_2 = 3$ . Для отбора кандидатов в устойчивые отражатели использован описанный выше метод, основанный на оценке дисперсии амплитуды РЛ сигнала. При этом для метода PS-InSAR выбраны пороговые значения  $\gamma_1 = 2,5$ ,  $\gamma_2 = 0,2$ .

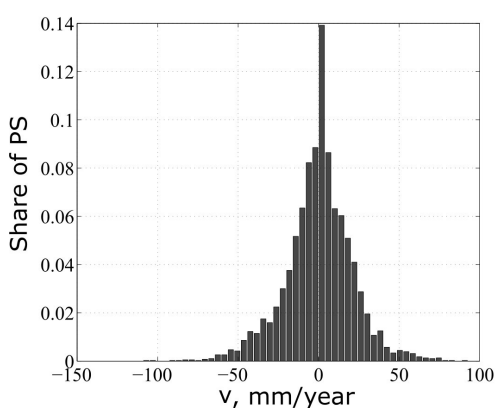
Отметим, что набор пар устойчивых отражателей, полученный методом PSP, зависит от исходного набора устойчивых отражателей  $P_0$ . В работе [13] для получения  $P_0$  предлагается сосчитать временную когерентность (6) всех ребер между соседними точками изображения, а затем проредить множество пар в соответствии с алгоритмом PSP. Также указывается, что при выполнении требований к  $P_0$  результат работы алгоритма PSP слабо зависит от исходного множества устойчивых отражателей  $P_0$ . Поэтому в данной работе при обработке по предложенному модифицированному методу PSP для выбора множеств  $P_0$  и  $P$ , как и для метода PS-InSAR, использован описанный выше метод, основанный на оценке дисперсии амплитуды РЛ сигнала, с пороговыми значениями  $\gamma_1 = 2,5$ ,  $\gamma_2 = 0,15$  и  $\gamma_1 = 2,5$ ,  $\gamma_2 = 0,25$  соответственно.

Метод PS-ImSAR с выбранным пороговым значением  $\beta_1$  позволил выделить 2334 устойчивых отражателя. Модификация метода PSP позволила выделить 3829 устойчивых отражателей. Полученные результаты оценки скоростей смещения устойчивых отражателей и поправок априорной высотной модели представлены на рис. 2. Выделенные обоими методами устойчивые отражатели показаны на рисунке в виде цветных точечных маркеров на фоне амплитудной компоненты одного из РЛ снимков. Здесь и на рис.4 цвета маркеров соответствуют полученным оценкам скорости смещения соответствующих участков местности (значения шкал указаны в мм/год) или поправок априорной высотной модели (значения шкал указаны в метрах). Отметим, что отображаемые скорости смещений отражают проекцию смещений соответствующих объектов или участков местности на направление LOS. Положительные значения скоростей смещения устойчивых отражателей (теплые тона цветов маркеров) соответствуют приближению соответствующего участка к спутнику (в том числе смещению объекта на оползневом склоне, ориентированному на спутник).

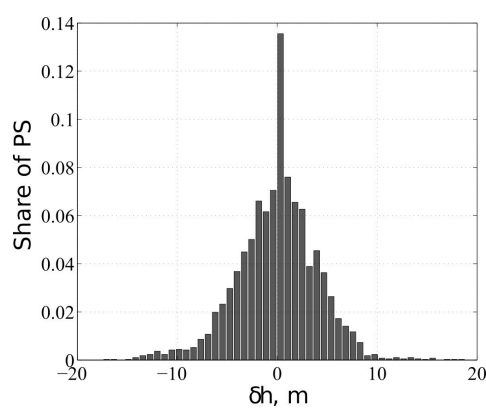
Отметим, что выделенные обоими методами устойчивые отражатели покрывают не только территорию плотной застройки. Отдельные отражатели выделены и в зонах преобладающей густой растительности – они соответствуют отдельным постройкам и сооружениям, а также участкам открытой почвы. Также отметим, что модификацией метода PSP получено более гладкое распределение скоростей смещений. Этот метод позволил выделить некоторые участки местности, которые подвергаются существенным геодинамическим воздействиям. Например, проседание порядка 20 мм/год (в проекции на LOS) демонстрируют несколько пирсов.

На рис.3 приведены распределения скоростей смещения и поправок априорной высотной модели, полученные предложенной модификацией метода PSP. Отметим, что для обоих методов полученные поправки априорной высотной модели имеют нулевое среднее и стандартное отклонение 4,4 м. Для модификации метода PSP лишь для небольшой доли отражателей характерна значительная скорость смещения или поправка по высоте. Полученные поправки априорной высотной модели могут использоваться для уточнения использованной ЦМР или выделения высотных объектов на участках местности, выделенных в качестве устойчивых отражателей.

Детальная карта смещений, полученная по результатам обработки по предложенной модификации метода PSP, показана на рис.4. Устойчивые отражатели показаны на рисунке цветными точечными маркерами на фоне спутникового снимка сверхвысокого пространственного разрешения в видимом диапазоне (© Google, DigitalGlobe, 2013). Стрелкой показана проекция на земную поверхность направления LOS, имеющего для случая использовавшейся интерферометрической цепочки РЛ снимков направляющие косинусы  $C_H=-0,766$ ,  $C_N=0,075$ ,  $C_E=-0,639$ .



а) Модификация метода PSP. Распределение устойчивых отражателей по скоростям.



б) Модификация метода PSP. Распределение устойчивых отражателей по поправкам высотной модели.

Рис. 3. Распределения скоростей смещения и поправок априорной высотной модели для модификации метода PSP.

Анализ полученных результатов показывает, что предложенная модификация метода PSP позволяет выделять участки с существенными скоростями смещений. Полученное распределение зон с наблюдаемыми положительными и отрицательными скоростями смещений (соответствующими приближению и удалению объектов от спутника) не является гладким, что может являться следствием оползневых процессов на склонах различной ориентации.

Существенным недостатком предложенной модификации метода PSP является использование линейной модели смещений устойчивых отражателей РЛ сигнала. Это ограничивает возможность выявления зон активизации геодинамических процессов. Необходимо отметить, что данный недостаток присущ и традиционному методу PS-InSAR. Использование гипотезы о стабильности (в среднем) всей наблюдаемой территории может приводить к ошибкам оценки абсолютных скоростей смещения в случае наличия обширных зон геодинамических процессов. Полученные результаты нуждаются в калибровке с использованием геодезических методов наблюдения геодинамических процессов.

Дальнейшее развитие описанного подхода может заключаться в организации многоступенчатой процедуры выявления устойчивых отражателей. Предложенная модификация метода PSP может использоваться на первом этапе для выделения стабильных участков местности или участков, демонстрирующих линейные смещения. На следующем этапе зафиксированный таким образом набор устойчивых отражателей может дополняться с использованием нелинейной модели смещений, обеспечивая построение детальной карты деформаций наблюдаемой поверхности, охватывающей, в том числе, области активизации геодинамических процессов.

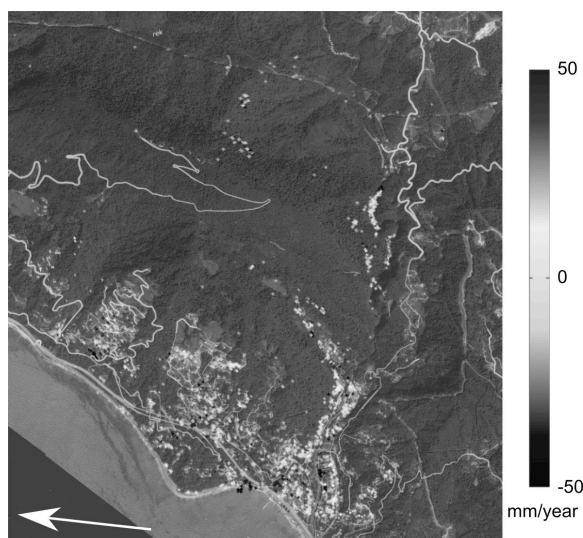


Рис. 4. Карта смещений земной поверхности, полученная при применении предложенной модификации метода PSP (картографические данные: © Google, DigitalGlobe, 2013).

### **Заключение**

В данной работе приведено сравнение двух методов определения скоростей смещения участков местности и поправок ЦМР на основе обработки интерферометрической цепочки РЛ спутниковых снимков. Первый из методов – известный метод PS-InSAR позволяет определить скорости смещения меньшего числа участков местности. Предложенная модификация метода PSP продемонстрировала свою работоспособность и возможность выделения зон, демонстрирующих существенное проседание или подъем (со скоростью порядка 20 мм/год в проекции на LOS). Метод PSP без развертки фазы может применяться для определения скоростей смещения участков местности в проекции на направление наблюдения и поправок ЦМР при мониторинге интенсивных оползневых процессов на территории с сильно пересеченным рельефом. Получаемые результаты в этом случае требуют тщательного анализа с учетом ориентации и крутизны склонов и применения калибровки с использованием геодезических методов наблюдения геодинамических процессов на отдельных участках.

### **Литература**

1. Горный В.И., Тронин А.А. Обзор достижений последнего десятилетия в области применения спутниковых методов дистанционного зондирования при геологических и геофизических исследованиях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т.9, № 5. — С. 116–132.
2. Bamler R., Hartl P. Synthetic aperture radar interferometry // Inverse problems. — 1998. — Vol. 14, No. 4. — P. 1–54.
3. Hetland E.A., Musé P., Simons M., Lin Y.N., Agram P.S., DiCaprio C.J. Multiscale InSAR time series (MInTS) analysis of surface deformation // Journal of Geophysical Research: Solid Earth (1978–2012). — 2012. — Vol. 117, No. B2.
4. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Смольянинова Е.И., Голубев В.И., Дмитриев П.Н., Тимошкина Е.П., Хайретдинов С.А. Обобщение опыта применения различных методов обработки РСА снимков для изучения и мониторинга оползневой активности склонов в районе Большого Сочи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2016. — Т.13, № 6. — С. 137–147.
5. Cigna F., Bianchini F., Casagli N. How to assess landslide activity and intensity with Persistent Scatterer Interferometry (PSI): the PSI-based matrix approach // Landslides. — 2013. — No. 10. — P. 267–283.

6. Горный В.И., Крицук С.Г., Латыпов И.Ш., Оловянный А.Г., Петров С.Д., Тронин А.А. О механизме знакопеременных вертикальных движений поверхности городской среды (по результатам спутниковой радиолокационной интерферометрии) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2014. — Т.11, № 3. — С. 129–139.

7. Филатов А.В., Евтюшкин А.В., Васильев Ю.В. Многолетний геодинамический мониторинг нефтегазовых месторождений Западной Сибири методом спутниковой радиолокационной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — Т.9, № 2. — С. 39–47.

8. Розенберг И.Н., Лупян Е.А., Железнов М.М., Василейский А.С. Возможности использования спутниковых технологий для мониторинга железнодорожной инфраструктуры / Ренессанс железных дорог: фундаментальные научные исследования и прорывные инновации: коллективная монография членов и научных партнеров Объединенного ученого совета ОАО «РЖД» / под ред. Б.М. Лapidуса. МО, Ногинск: Аналитика Родис, 2015. — С. 97–112.

9. Заичко В.А., Селин В.А. Мероприятия Федерального космического агентства России по созданию космических средств радиолокационного наблюдения и технологий комплексной обработки данных // Вестник СибГАУ. — 2013. — № 5 (51). — С. 4–5.

10. Nitti D.O., Bovenga F., Nutricato R., Intini F., Chiaradia M.T. On the use of COSMO/SkyMed data and Weather Models for interferometric DEM generation // European Journal of Remote Sensing. — 2013. — Vol. 46. — P. 250–271.

11. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2000. — Vol. 38, No. 5. — P. 2202–2212.

12. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2001. — Vol. 39, No. 1. — P. 8–20.

13. Costantini M., Falco S., Malvarosa F., Minati F. A new method for identification and analysis of persistent scatterers in series of SAR images // Geoscience and Remote Sensing Symposium. — 2008. — Vol. 2. — P. 449–452.

14. Воронцов К.В., Потапенко А.А. Модификации EM-алгоритма для вероятностного тематического моделирования // Машинное обучение и анализ данных. — 2013. — № 6. — С. 657–686.

15. Адуенко А.А., Василейский А.С., Карелов А.И., Рейер И.А., Рудаков К.В., Стрижов В.В. Алгоритм выделения и совмещения устойчивых отражателей на спутниковых снимках // Компьютерная оптика. — 2015. — Т. 39, № 4. — С. 622–630.

16. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // *Alvey vision conference*. — 1988. — Vol. 15. — P. 147–151.
17. Lowe D. Distinctive image features from scale invariant keypoints // *IJCV*. — 2004. — Vol. 60, No. 2. — P. 91–110.
18. Muja M., Lowe D.G. Fast Approximate Nearest Neighbors with Automatic Algorithm Configuration // *VISAPP (1)*. — 2009. — P. 331–340.
19. Prati C., Ferretti A., Perissin D. Recent advances on surface ground deformation measurement by means of repeated space-borne SAR observations // *Journal of Geodynamics*. — 2010. — Vol. 49, No. 3. — P. 161–170.
20. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Butbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // *Reviews of Geophysics*. — 2007. — Vol. 45.