

УДК 528.85

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОВРЕМЕННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКИ ALOS/PALSAR ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

А. В. Филатов

Научно-исследовательский институт прикладной информатики и математической
геофизики Балтийского федерального университета имени Иммануила Канта

Статья поступила в редакцию 2 декабря 2015 г., после доработки – 9 февраля 2016 г.

Аннотация: В работе рассмотрены особенности интерферометрической обработки материалов многопроходной радиолокационной съемки ALOS/PALSAR в условиях изменяющихся ландшафтов. В качестве исследуемых территорий выбраны промышленные площадки западного сектора российской Арктики: Ковдорский горно-обогатительный комбинат и Кольская горно-металлургическая компания и прилегающие к ним территории. Предложен новый метод коррегистрации разновременных радиолокационных изображений, необходимый для точного совмещения кадров в условиях временной декорреляции. Приведены карты деформаций земной поверхности и скоростей смещений стабильных отражающих объектов. Сделан вывод о применимости данных ALOS и ALOS-2 при выполнении проектов по горно-экологическому мониторингу месторождений полезных ископаемых на территории Кольского полуострова.

Ключевые слова: радиолокатор с синтезированной апертурой, спутниковая радиолокационная интерферометрия, интерферометрия постоянных отражателей, коррегистрация радиолокационных изображения, ALOS, PALSAR.

Abstract. The given paper describes features of interferometric processing of ALOS/PALSAR multi-temporal radar acquisitions under conditions of changeable landscapes. Industrial areas of western part of Russian Arctic such as Kovdor ore

mining and processing enterprise and Kolskaya mining company and adjacent territories were selected as regions of interest. The new method of multi-temporal radar images coregistration was proposed for accurate frames resampling under conditions of temporal decorrelation. Maps of ground surface deformations and persistent scatterers displacements rates were presented. It is concluded that ALOS and ALOS-2 data can be applied to projects on ecological monitoring of mineral resources deposits of Kola Peninsula.

Key words: synthetic aperture radar, satellite radar interferometry, persistent scatterers interferometry, radar images coregistration, ALOS, PALSAR.

1. Введение

В западной части российского сектора Арктики сосредоточено значительное число горнотехнических объектов: АО «Апатит», АО «Ковдорский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «ОЛКОН», АО «Ловозерский ГОК», ГОК «Олений ручей» СЗФК, а также объекты по металлургической переработке (Кандалакшский алюминиевый завод, АО «Кольская ГМК») и добыче строительных материалов. Крупные горнодобывающие предприятия наряду с их большой социально-экономической значимостью оказывают существенное влияние на окружающую природную среду [1].

В ближайшей перспективе регион будет являться крупным стратегическим центром добычи и транспортирования нефтеуглеводородов [2]. Для успешного решения задач промышленной и экологической безопасности действующих горнодобывающих предприятий и планируемых нефтегазообъектов в регионе необходимы организация и проведение системного мониторинга этих объектов как природно-технических систем [2, 3]. Это позволит выявить опасные деформационные процессы на ранних стадиях их формирования в эксплуатируемых массивах горных пород и своевременно принять решения по защите как самих объектов, так и окружающей природно-технической среды.

В настоящее время данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ)

активно применяются для решения задач мониторинга месторождений полезных ископаемых, транспортной инфраструктуры и стратегически важных объектов. Использование оптических и радиолокационных космоснимков сокращает финансовые и временные затраты по сравнению с традиционными методами. Данные ДЗЗ имеют широкий спектр возможных приложений, таких как обнаружение лесных пожаров, мониторинг разливов нефти, контроль сжигания попутного нефтяного газа, обнаружение и мониторинг смещений земной поверхности. Важную роль при решении таких задач играет оперативность получения информации и частая повторяемость данных.

Эффективным методом мониторинга смещений земной поверхности и техногенных объектов является радиолокационная интерферометрия. Преимуществом радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны (РСА) является способность получать изображение земной поверхности независимо от условий освещенности и облачности, что особенно актуально для северных широт. Метод спутниковой радиолокационной интерферометрии использует эффект интерференции электромагнитных волн и основан на математической обработке нескольких когерентных амплитудно-фазовых измерений одного и того же участка земной поверхности со сдвигом в пространстве приемной антенны РСА. Известно успешное применение интерферометрии для обнаружения просадок грунтов в районах угольных шахт в Англии, нефтяных месторождений России, крупных мегаполисах Европы, зонах землетрясений и действующих вулканов.

За последние годы для отработки технологии определения подвижек земной поверхности на основе интерферометрии постоянных отражателей PSI (Persistent Scatterers Interferometry) доступны для обработки и накоплены архивы спутниковых радарных съемок с различным периодом повторного прохода:

— TerraSAR-X/TanDEM-X, X-диапазон, длина волны 3 см, период повторной съемки 11 суток;

— CosmoSkyMed 1-4, X-диапазон, длина волны 3 см, периодичность съемки 16 суток (съемка с 4-х спутников в 1, 9, 10, 13 дни в интервале)

— ERS-1, 2, ENVISAT, C-диапазон, длина волны 5.6 см, период повторной съемки 35 суток;

— ALOS, ALOS-2, L-диапазон, длина волны 23 см, период повторной съемки 46 суток.

2. Постановка задачи

Спутник ALOS с радиолокатором PALSAR на борту работал на орбите в период 2006-2011 годы. Данные ALOS\PALSAR, полученные во время эксплуатации, использованы тысячами исследователей по всему миру для реализации научных проектов, с целью мониторинга измерений земной поверхности. Для каждого участка суши радиолокатор отснял от 10 до 25 сцен с повторных орбит космического аппарата, что позволяет использовать накопленные данные для интерферометрической обработки. В период с 2007 по 2011 годы продемонстрировано успешное применение данных ALOS\PALSAR для картирования и мониторинга медленных деформации земной поверхности вследствие разработки месторождений нефти и газа, в частности Губкинского и Самотлорского участков [4-5]. В работах использованы разные подходы к обработке радарных данных, включая дифференциальную интерферометрию и метод постоянных отражателей. Построены карты деформаций земной поверхности с интервалами от 1 до 3 лет, а также карты скоростей смещений стабильных отражающих объектов. Выполненные исследования показали применимость архивных данных ALOS\PALSAR для решения задач обнаружения и картирования смещений вследствие извлечения углеводородов.

24 мая 2014 года Японское агентство аэрокосмических исследований (JAXA) успешно запустило радарный спутник ALOS-2, являющийся аналогом ALOS, с периодом повторной съемки 14 суток. При этом JAXA в рамках гранта предоставляет возможность получения сцен ALOS в количестве 150 сцен, следовательно, популярность и полезность архивных данных не иссякает.

В настоящей работе ставилась задача оценить применимость материалов многопроходной съемки ALOS\PALSAR (L-диапазон) для оценки деформаций земной поверхности в условиях Арктики. Выводы позволят судить о целесообразности и особенностях использования новых данных ALOS-2 для мониторинга деформаций земной поверхности в условиях Арктики. Для обработки выбраны промплощадки Ковдорского ГОК и Кольской ГМК, а также прилегающие к ним территории. Обработка и анализ данных многопроходной съемки ALOS\PALSAR, в рамках выполненных работ, выявили ряд особенностей, приведенных ниже.

Во-первых, запуски ALOS и ALOS-2 преследовали достижение разнообразных научных целей исследователей по всему миру, поэтому съемка производилась по заранее составленной программе (BOS – Basic Observation Scenario). В соответствии с программой ALOS\PALSAR выполнял съемку одних и тех же участков в 2 разных режимах. В летние и осенние месяцы использовался режим FBD (Fine Beam Dual): излучение зондирующего сигнала с горизонтальной поляризацией, поочередный прием отраженных сигналов горизонтальной и вертикальной поляризации (HH, HV). В зимние и весенние месяцы – режим FBS (Fine Beam Single): излучение и прием горизонтально поляризованного сигнала. Для режима FBS частота дискретизации принимаемого сигнала по дальности составляет 32МГц, тогда как для FBD 16МГц вследствие переключения приемного тракта между горизонтальной и вертикальной поляризацией. Поэтому пространственное разрешение для FBS – 5м, FBD – 10м. Для метода интерферометрии постоянных отражателей в идеале необходимо использовать более 20 повторных съемок одной и той же территории, выполненных с повторных орбит. Для набора достаточного числа кадров ALOS\PALSAR необходимо использовать съемку в обоих режимах: FBS и FBD. Поэтому для данных FBD выполняется увеличение частоты дискретизации в 2 раза путем применения sinc-интерполяции. Передискретизация может быть выполнена над данными уровня обработки 1.0,

что реализовано в связке программ ROI PAC+ALOS_preproc [7-9]; или над сфокусированными данными уровня обработки 1.1 в формате SLC (Single Look Complex), как в программном продукте SARscape [10].

Вторая особенность обнаружилась в ходе обработки данных для территории Арктики, в более ранних работах посвященных месторождениям Западной Сибири проявлялась в меньшей степени [5,6]. Данная особенность связана со значительными изменениями условий отражения радиолокационного сигнала от поверхности и объектов за время между съемками, что приводит к временной декорреляции и снижению когерентности разновременных кадров. В особенности снижение интерферометрической когерентности проявляется для летних и зимних съемок, вследствие маскирующего влияния растительности и снежного покрова. В ранних работах описывающих метод интерферометрии постоянных отражателей [11,12] утверждается, что площадная когерентность не важна, так как используются измерения отраженного сигнала от особых стабильных объектов (persistent scatterers). Однако, для обработки разновременных радиолокационных сигналов, отраженных от одних и тех же объектов, необходима точная коррегистрация исходных данных. Так как процесс коррегистрации основан на расчете локальной кросс-корреляции радарных кадров, в условиях изменяющихся ландшафтов Арктики точное совмещение кадров затруднено. В связи с этим, в работе ставится задача детального изучения и описания процесса коррегистрации радарных кадров, а также поиск методов и параметров, необходимых для точного совмещения многовременных РЛИ.

Для дальнейшей обработки многовременных радиолокационных данных применяются методы интерферометрии постоянных отражателей, например, PSInSAR (Permanent Scatterers InSAR) [12] или StaMPS (Stanford Approach for Persistent Scatterers) [13]. Математическая обработка измерений радиолокационного сигнала, отраженного от стабильных объектов на земной поверхности, позволяет достичь теоретической точности расчета смещений до

первых миллиметров. При этом требуется значительное количество (>20) повторных съемок, что не всегда достижимо при использовании PCA ALOS/PALSAR даже при объединении режимов FBS и FBD. В связи с этим необходим подход, эффективно использующий ограниченное число повторных радиолокационных съемок, например метод коротких базовых линий SBAS (Small Baselines).

Для решения поставленных задач использовано свободно распространяемое программное обеспечение StaMPS/MTI и коммерческий продукт SARscape. Дополнительная обработка, включая исследование локальной кросс-корреляции радарных кадров, выполнена с применением разрабатываемого ПО FMATRIX, поддерживающего распределенную обработку.

3. Точная коррегистрация разновременных данных ALOS/PALSAR

Для улучшения точности совмещения разновременных радиолокационных кадров детально изучен процесс коррегистрации, используемый в методе радарной интерферометрии и реализованный в существующем программном обеспечении DORIS [14], SARscape [10]. Данный процесс состоит из 5 этапов и выполняется для пары кадров, которые обычно обозначаются как master и slave:

— Приближенный сдвиг для целой сцены рассчитывается на основе орбитальных данных, находящихся в служебной информации радиолокационного кадра.

— На втором этапе на обоих кадрах выделяется множество окон большого размера (~1024x4096). Каждое окно на slave-кадре попиксельно смещается относительно соответствующей области master-кадра и для каждого положения рассчитывается локальная кросс-корреляция амплитудных компонент радиолокационных изображений (РЛИ). Для каждого окна находится относительный сдвиг, при котором достигается максимальное значение кросс-корреляции. Из смещений, найденных на всех выделенных окнах по принципу максимальной локальной кросс-корреляции выделяется результирующий сдвиг,

который позволяет скорректировать результат, полученный на первом этапе.

— Далее с субпиксельной точностью рассчитываются локальные сдвиги для множества окон (~400) небольшого размера (~32x32), распределенных по всему изображению. Для каждого окна и соответствующей ему области на master-кадре по принципу, используемому на предыдущем этапе, находится локальный сдвиг с точностью до 1 пиксела. Для совмещенных окон производится интерполяция с применением дискретного преобразования Фурье и расчет локальной кросс-корреляции для того, чтобы вычислить локальный сдвиг с субпиксельной точностью.

— Полученные локальные сдвиги используются для построения полинома коррегистрации, на основе которого выполняется преобразование slave-кадра. Для отсека некорректных сдвигов устанавливается пороговое значение локальной кросс-корреляции (0.2).

— Slave-кадр пересчитывается в координаты master-кадра.

Проблема коррегистрации радиолокационных кадров в условиях низкой когерентности разновременных данных, заключается в расчете неверных значений локальных сдвигов. Если значительная ошибка в расчете сдвига появляется уже на втором этапе коррегистрации, кадры оказываются полностью не совмещенными, а интерферограмма бесполезной. Ошибочные значения могут быть рассчитаны и на этапе точной коррегистрации. При расчете коэффициентов полинома коррегистрации такие неверные локальные сдвиги отбрасываются, но в этом случае кадры совмещаются не полностью. Результатом является интерферограмма с четкой границей между информативной и зашумленной частью, несвязанной с ландшафтами земной поверхности.

В ходе анализа процесса расчета локальной кросс-корреляции и сдвигов с субпиксельной точностью установлено, что неверные значения возникают вследствие недостаточного размера окна коррегистрации. В существующем ПО DORIS и SARscape значение по умолчанию для окна коррегистрации

составляет 32x32 пиксела, в инструкциях к ПО рекомендуется 64x64 пиксела. На рис. 1 продемонстрировано изменение в расчете значений локальной кросс-корреляции двух кадров ALOS/PALSAR при увеличении размера окна субпиксельной коррегистрации с 64x64 до 128x128. Размеры задаются как 2^n , так как расчет основан на использовании быстрого преобразования Фурье. На рис. 1 показана зависимость значения локальной кросс-корреляции от относительных сдвигов участков master и slave кадров в направлении наклонной дальности (ось X) и азимута (ось Y). Максимальное значение ожидается близким к нулевому сдвигу, однако, при использовании окна 64x64 сдвиг равен -39, 60 и обозначен черным кругом на рис. 1а. Увеличив окно (рис. 1б), удалось достичь корректного расчета локального сдвига. При обработке радарных данных, например, для территории с редкой растительностью или в случае минимального интервала между съемками количество таких участков невелико и не является проблемой. Однако, для территории, где изменения природных ландшафтов земной поверхности являются причиной временной декорреляции разновременных радарных кадров, увеличение окна коррегистрации может стать решением проблемы совмещения РЛИ.

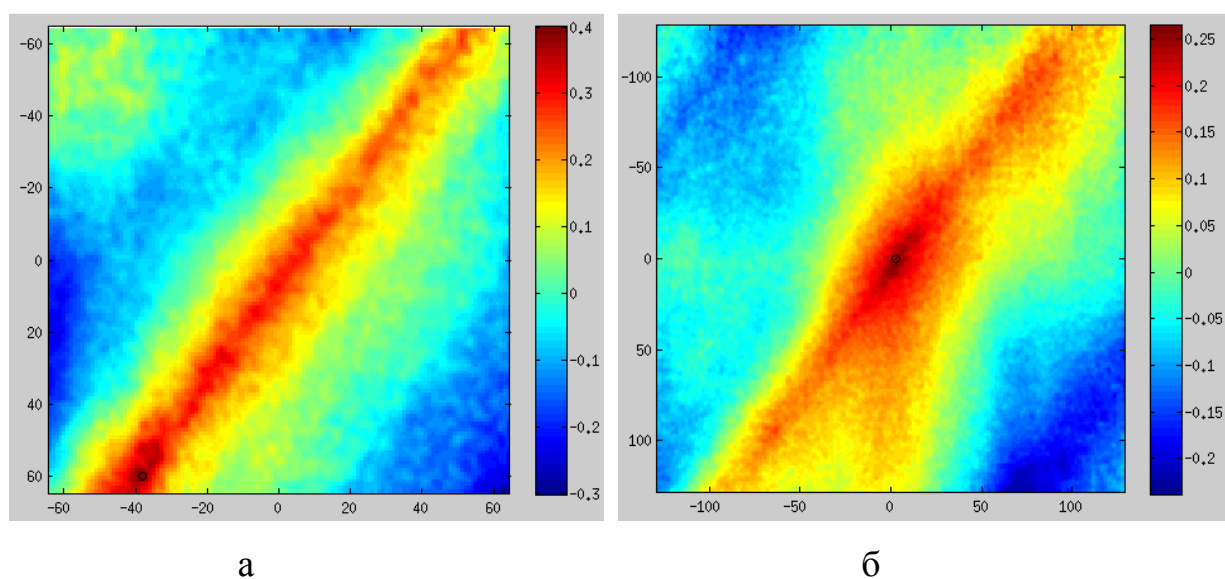


Рис. 1. Значения локальной кросс-корреляции в зависимости от локальных сдвигов двух РЛИ для разных размеров окна: а) 64x64, б) 128x128.

В результате проведенного анализа предложен адаптивный алгоритм коррегистрации разновременных данных, который позволил выполнить интерферометрическую обработку кадров ALOS\PALSAR в условиях изменяющихся ландшафтов Арктики.

1. Расчет сдвига целого slave-кадра относительно master на основе орбитальных данных и грубой коррегистрации не выполнять, так как для пар кадров со значительной длиной перпендикулярной базовой линии расчет может быть неверным.

2. В пределах кадра равномерно распределить 2000-4000 окон, начальный сдвиг для которых рассчитать на основе орбитальной информации.

3. Для каждого положения, последовательно устанавливая размер окна субпиксельной коррегистрации 32x32, 64x64, 128x128 и рассчитывая для каждого значения кросс-корреляции, определить локальный сдвиг, отстоящий от нулевого не более чем на заданный (8 пикселей), как показано на рис. 1а.

4. Расчет полинома коррегистрации и пересчет slave-кадра в координаты master проводить по существующему алгоритму.

При описании процесса коррегистрации некоторые детали опущены для краткости описания метода и его модификации. Новый алгоритм реализован в разрабатываемом интерферометрическом процессоре FMATRIX.

4. Описание применяемых методов интерферометрической обработки

В данной работе использованы данные многопроходной архивной радарной съемки ALOS\PALSAR в количестве 10 сцен за 2007-2010 года на каждый из участков Ковдорский ГОК и Кольскую ГМК. Вследствие наличия значительного объема исходного материала для каждой территории выполнено несколько видов обработки.

1. Интерферометрическая обработка двух пар кадров с целью построения цифровой модели местности и расчета смещений земной поверхности с использованием ПО SARscape. Описание методов обработки приведено в работах [15,16]

2. Обработка многопроходной съемки по методам интерферометрии постоянных отражателей StaMPS [13] и PSInSAR [12] с использованием ПО StaMPS/MTI и SARscape соответственно.

3. Обработка многопроходной съемки по методу коротких базовых линий SBAS с расчетом скоростей смещений постоянных интерферометрических отражателей с использованием ПО StaMPS/MTI.

Особенность применяемого метода SBAS состоит в анализе всех интерферометрических пар, составленных на основе исходных кадров, в выборе и дальнейшей обработке тех, для которых временная база (интервал между съемками) и длина перпендикулярной базовой линии не превышают заданных пределов. На рис. 2 приведены составленные и обработанные пары радарных кадров: 25 на основе данных ALOS/PALSAR на территорию Ковдорского ГОК, 22 для Кольской ГМК. По оси X отложены даты съемок, по оси Y – длины перпендикулярных базовых линий.

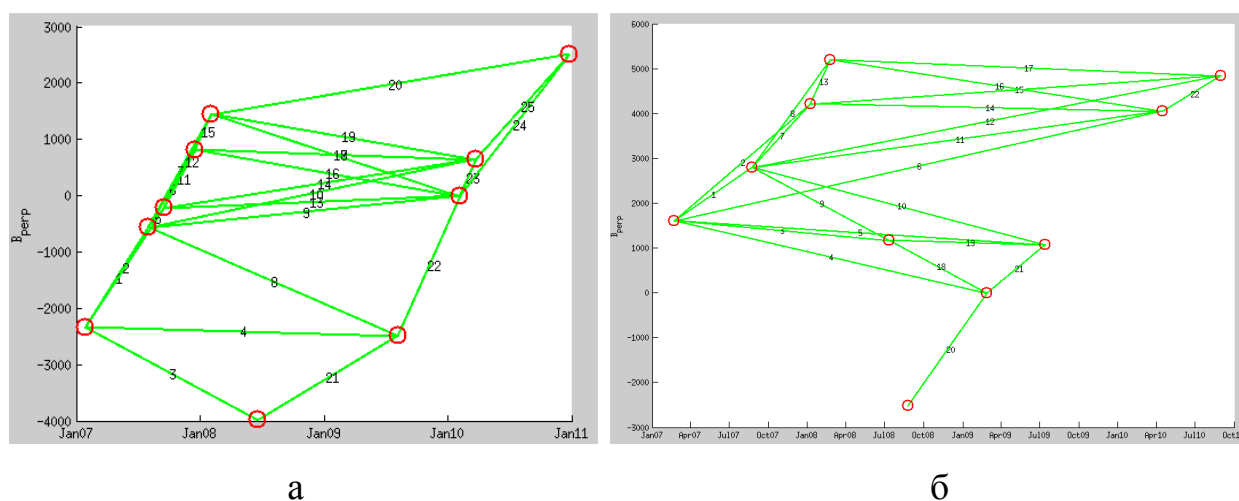


Рис. 2. Граф построенных интерферометрических пар при обработке по методу коротких базовых линий SBAS на основе данных ALOS/PALSAR на пропощадки: а) Ковдорский ГОК, б) Кольская ГМК.

На следующем этапе выполняется предварительный выбор точек, являющихся постоянными интерферометрическими отражателями в соответствие с индексом дисперсии амплитуды:

$$D_A = \frac{\sigma_A}{m_A}$$

где: σ_A - дисперсия амплитуды, m_A - среднее значение амплитуды, D_A - индекс дисперсии амплитуды.

Выбираются точки, для которых $D_A \leq 0.6$.

Дальнейшие расчеты проводятся для N точек из предварительной выборки в соответствие с компонентами дифференциальной интерферометрической фазы:

$$\Phi_{x,i} = W(\Phi_{\varepsilon,x,i} + \Phi_{def,x,i} + \Phi_{atm,x,i} + \Phi_{orb,x,i} + \Phi_{n,x,i})$$

где x – координаты точки (постоянного отражателя) на радиолокационном кадре (по азимуту и наклонной дальности), i – индекс интерферограммы, $W(\bullet)$ означает остаток от деления на 2π , т.к. фаза радиолокационного сигнала регистрируется в интервале от $-\pi$ до $+\pi$.

Расчет смещений постоянных отражателей (техногенных объектов и элементов микрорельефа земной поверхности) основан на разделении компонент дифференциальной интерферометрической фазы на составляющие, различающиеся характеру изменений в пространстве кадра и во времени наблюдений [17]. Особенности и характеристики компонент приведены в таблице:

Характеристики компонент интерферометрической фазы

	Компонента	Изменения в пространстве кадра	Во времени
$\Phi_{def,x,i}$	Смещения	Медленные изменения	Медленные изменения
$\Phi_{atm,x,i}$	Атмосферный сдвиг	Медленные изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{orb,x,i}$	Ошибка определения орбиты	Медленные изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{n,x,i}$	Некоррелируемый фазовый шум	Быстрые изменения	Быстрые изменения
$\Phi_{\varepsilon,x,i}$	Ошибка устранения рельефа	Быстрые изменения	Пропорционально перпендикулярной базовой линии

Исходя из характеристики компоненты $\Phi_{def,x,i}$ в таблице, метод определяет величину деформаций обширных областей земной поверхности, тогда как смещения отдельных объектов воспринимаются как шум. Данная особенность метода подходит для исследования деформаций вызванных перемещением блоков земной поверхности. Особенность такого метода обработки точечных измерений заключается в том, что в отличие от PSInSAR [12] не используется линейная зависимость деформации от времени, что позволяет обнаруживать затухающие смещения.

4. Результаты обработки

Используя архивные данные многопроходной радарной съемки ALOS/PALSAR и методы интерферометрической обработки, получены следующие результаты:

1. ЦММ на территории Ковдорского ГОК на основе пары кадров 27.01.2007, 15.12.2007 и Кольской ГМК – 10.07.2008, 25.08.2008. Полученные ЦММ использованы как опорные при расчете деформаций земной поверхности по методу дифференциальной интерферометрии.

2. Карты деформаций земной поверхности на территории Ковдорского ГОК на основе пары кадров 15.12.2007, 22.03.2010 и Кольской ГМК – 08.01.2008, 15.04.2010.

3. Карты скоростей смещений техногенных объектов и элементов микрорельефа земной поверхности на территории Ковдорского ГОК и Кольской ГМК за период 2007-2010 годы.

На рисунке 3 в цветовой шкале представлены деформации земной поверхности промплощадки Кольской ГМК, включая город Заполярный, хвостохранилище, карьеры Центральный и Южный. Использован метод двухпроходной дифференциальной интерферометрии, реализованный в SARscape. Представлены смещения, рассчитанные с погрешностью не более 3см. Погрешность рассчитана на основе параметра интерферометрической когерентности разновременных радиолокационных измерений. Для остальных

участков погрешность превышает 3см вследствие временной декорреляции, связанной с изменениями отражающей поверхности. Карта деформаций на территории промплощадки Ковдорского ГОК не приведена, так как смещения, рассчитанные с погрешностью 4 см, заключены в интервале от -4 до +2см.

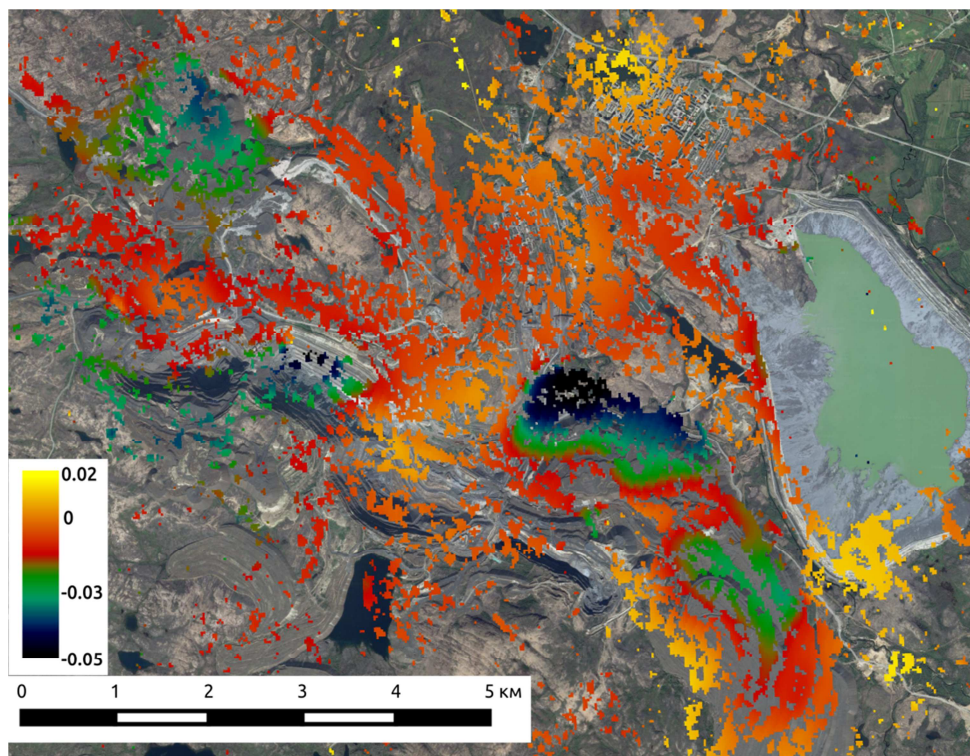


Рис. 3. Карта деформаций земной поверхности на территории промплощадки Кольской ГМК за период 2 года по данным ALOS/PALSAR (даты съемки: 08.01.2008, 15.04.2010). Цветовая шкала в метрах.

На рисунке 4 представлены скорости смещений стабильных интерферометрических отражателей по результатам применения метода SBAS с использованием ПО StaMPS/MTI и FMATRIX. Значения скоростей рассчитаны путем линейной аппроксимации временных рядов смещений каждой точки между последовательными съемками. Среднеквадратическое отклонение значений смещений от линии тренда составляет 5мм и указывает на точность применения метода. Для территории промплощадки Кольской ГМК точность расчета скоростей смещений оказалась низкой. Точек с погрешностью менее 5мм оказалось не достаточно для построения карты скоростей смещений.

Причина заключается в недостаточности интерферометрических пар с короткими базами и низкой плотности стабильных отражающих объектов.

Применение для обработки многопроходной съемки ALOS\PALSAR ПО SARscape оказалось неуспешным, результаты оказались неудовлетворительными вследствие некорректной коррегистрации кадров.

В качестве фоновых изображений (рис. 3, 4) использованы оптические снимки, доступные через картографический сервис Google Maps.

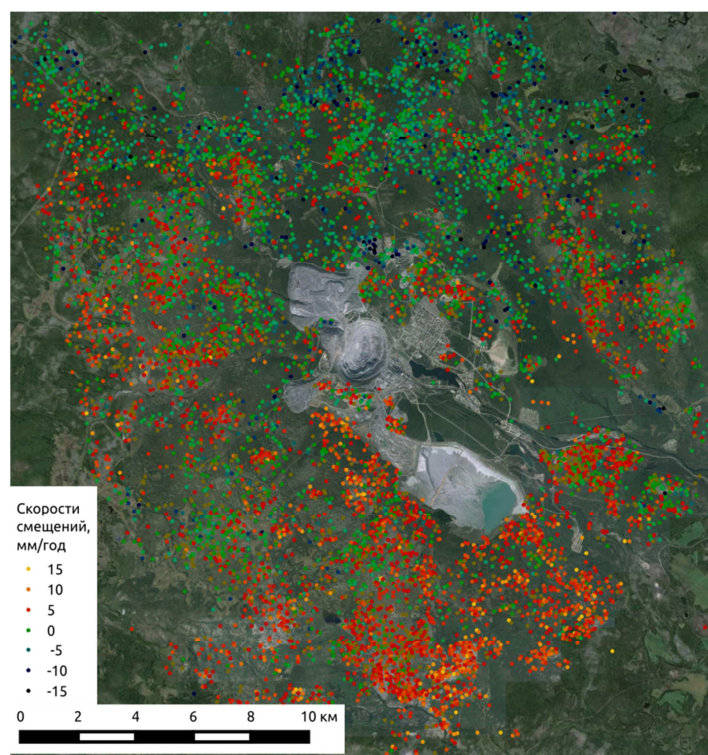


Рис. 4. Карта скоростей смещений стабильных отражающих объектов Ковдорского ГОК и прилегающих территорий по результатам обработки 10 кадров ALOS\PALSAR за 2007-2010 годы.

5. Выводы

Таким образом, для данных ALOS\PALSAR, доступных на территорию Ковдорского ГОК и Кольской ГМК, использованы и методы интерферометрии постоянных отражателей, и обработка отдельных пар радарных кадров. Выявлен ряд особенностей применения данных для исследования смещений земной поверхности в условиях Арктики. Предложенный метод

коррегистрации радарных кадров позволил уменьшить фазовый шум вследствие некорректного совмещения и тем самым увеличить информативность интерферограмм. По карте смещений (рис.3) на территории промплощадки Кольской ГМК обнаружено и картировано оседание земной поверхности на 5см за 2 года.

На основе полученных результатов можно сделать вывод о том, что данные ALOS\PALSAR и ALOS-2 рекомендуются к использованию при реализации научных проектов в качестве дополнительной информации о высотах и смещениях земной поверхности, либо в работах по исследованию и разработке новых методов. При этом необходимо использовать либо все доступные материалы, как сделано в данной работе, либо тщательно выбирать кадры для обработки. Для реализации коммерческих проектов по горно-экологическому мониторингу территорий добычи полезных ископаемых и важных промышленных объектов данные ALOS, ALOS-2 не подходят, так как невозможно дать гарантию успешного результата. Запуск спутника в первую очередь преследовал научные цели, поэтому заранее спланированная стратегия съемки в течение всего срока эксплуатации КА не может обеспечить равномерность и частоту съемки исследуемой территории, так необходимую для применения метода интерферометрии постоянных отражателей. Однако, использование архивных радарных данных ALOS\PALSAR остается актуальным в случае ретроспективного анализа смещений земной поверхности.

Кроме того, для обработки данных многопроходной радарной съемки предлагается использовать пары кадров, составленные на основе статистического исследования когерентности [18], а не длине базовой линии, и совмещать обработку отражений сигнала от стабильных объектов и метод площадной интерферометрии.

Данные ALOS\PALSAR предоставлены в рамках гранта JAXA RA4 #1070 “Complex study of radar interferometry potentialities for subsidence monitoring of

ground surface and technogenic areas in conditions of changeable natural landscapes”.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №15-29-06037.

Литература

1. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Калашник Н.А. О необходимости обеспечения геодинамической безопасности нефтегазовых объектов западного сектора российской Арктики // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2014. – № 2 (100). – С. 95-103.

2. Мельников Н.Н., Калашник А.А., Калашник Н.А., Каспарьян Э.В. Научно-организационные основы геодинамического мониторинга нефтегазовых объектов в регионе Баренцева моря в целях защиты окружающей природно-технической среды // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. – 2014. - № 6. – С. 5-10.

3. Мельников Н.Н., Калашник А.И., Каспарьян Э.В., Калашник Н.А. Концепция геодинамического мониторинга объектов нефтегазопромысла в регионе Баренцева моря // Геоэкология. – 2015. - № 2. – С. 166-174.

4. Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Технология построения цифровых моделей рельефа и оценки смещений методом радарной интерферометрии // Вестн. Новосиб. гос.ун-та. Серия: Информационные технологии. 2009. Т.7, вып. 1. С.66-72.

5. Филатов А.В., Евтюшкин А.В. Оценка деформаций земной поверхности в районах интенсивной нефтедобычи в Западной Сибири методом РСА интерферометрии по данным ENVISAT\ASAR и ALOS\PALSAR // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Т.6. №2. С.46-53.

6. А.В. Филатов, А.В. Евтюшкин, В.М. Брыксин. Using of SAR data and DInSar-PSInSar technique for monitoring Western Siberia and Arctic // Журнал

- радиоэлектроники: электронные журнал. 2012. N6.
URL:<http://jre.cplire.ru/jre/jun12/6/text.pdf>
7. ROI PAC Documentation Sean Buckley Ph. D. dissertation Chapter 3, Center for Space Research, Austin, 2000. – 63 p.
 8. ROI_PAC URL. // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.roipac.org>.
 9. ALOS Preprocessor. // [Электронные ресурс]. URL: http://www.sci.sdsu.edu/~rmellors/ALOS_preproc/ALOS_README_April_2010.txt
 10. SARscape. // [Электронные ресурс]. URL: <http://www.sarmap.ch/page.php?page=sarscape>.
 11. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent Non-linear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. Is. 9. P. 2202-2212.
 12. Ferretti A., Prati C., Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2001. V. 39. Is. 1. P. 8-20.
 13. Hooper A. Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation // Ph. D. Thesis. Stanford University. 2006.
 14. DORIS. // [Электронный ресурс]. URL: <http://doris.tudelft.nl>.
 15. Hanssen R.F. Radar Interferometry – Data Interpretation and Error Analysis. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. – 308 p.
 16. Филатов А.В. Метод обработки комплексных радиолокационных интерферограмм в условиях высокой временной декорреляции. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Алтайский государственный университет. Барнаул, 2009. 160 с.
 17. Piyush S.A. Persistent Scatterer Interferometry in Natural Terrain // Ph. D. Thesis. Stanford University. 2010.
 18. Goel K., Adam N. Distributed Scatterer Interferometry Approach for Precision Monitoring of Known Surface Deformation Phenomena // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2013. Vol. 52, No. 9.