

*А. В. Евтюшкин, В. М. Брыксин, А. В. Филатов*

## МЕТОД ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ УСТОЙЧИВЫХ ОТРАЖАТЕЛЕЙ В СРЕДЕ MATLAB НА ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОМ КЛАСТЕРЕ

*Рассмотрены особенности реализации метода Persistent Scatterers Interferometry в среде MATLAB на суперкомпьютерном кластере. Описан процесс и приведены результаты интерферометрической обработки многовременных спутниковых измерений, выполненных радаром ALOS/PALSAR в 2007–2011 гг. Для обработки использован разработанный программный комплекс высокоточной оценки смещений техногенных объектов. Предложена технология публикации скоростей смещений земной поверхности на основе сервисов GeoServer и Google Maps.*

*The features of the method implementation Persistent Scatterers Interferometry in MATLAB environment on a high performance computer cluster are considered. The process and results of interferometric processing of multi-time measurements made by radar ALOS/PALSAR in 2007–2011 is described. For processing software package developed used high-precision evaluation of the displacement of man-made objects. The technology publication of displacement velocity of terrestrial surface on the basis of GeoServer and Google Maps services is offered.*

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, космические снимки, геодинамический полигон, геодезические измерения, радарная интерферометрия, уголкового отражатель, PSI, PALSAR, TERRASAR-X.

**Key words:** remote sensing, space images, geodynamic polygon, geodetic measurement, radar interferometry, corner reflector, PSI, PALSAR, TERRASAR-X.

### Введение

Развитию ЭВМ и систем оптического и радарного дистанционного зондирования Земли нужна постоянная разработка оптимальных технологий и алгоритмов тематической обработки спутниковых данных. Так, разработаны методы высокопроизводительной обработки сканер-



ных изображений МСУ-Э на специализированном вычислительном комплексе СМ1630-КТС «Диск» на базе отдельного видеопроцессора с последовательной загрузкой фрагментов для отработки технологий мониторинга загрязнений снежного покрова и картирования переувлажненных почв [1; 2]. Автоматизированная потоковая обработка данных MODIS на суперкомпьютере SUN FIRE 15K и распределенных вычислительных ресурсах выполнена для оперативного мониторинга пожаров и прогнозирования зерновых культур Западной Сибири [3]. Для определения скоростей смещений техногенных объектов на Саянском геодинамическом полигоне интерферометрией устойчивых отражателей при малом числе повторных радарных снимков и ограниченном числе точек расчета создана программа PSIVelocityComp [4; 5].

147

Накопление достаточного объема повторных съемок радара ALOS/PALSAR с длиной волны в L-диапазоне, функционирующего на орбите в 2006–2011 гг., позволяет применить метод интерферометрии устойчивых отражателей Persistent Scatterers Interferometry (PSI) [6] на регионы нефтедобычи с большим числом техногенных объектов. Использованию повторных радарных съемок для мониторинга и картирования площадных подвижек земной поверхности в зонах вечной мерзлоты [7; 8], регионах шахтной добычи угля и калийных солей [9–11], разрабатываемых нефтегазовых месторождениях [4; 12] уделяется большое внимание. Перспективы строительства трубопроводов в прибрежной зоне от месторождений нефти и газа на Арктическом шельфе требуют разработки методов мониторинга нарушенных вечномерзлых и сезоннооттаивающих грунтов на труднодоступных территориях [13; 14].

При мониторинге просянок, возникших при катастрофическом затоплении калийного рудника, методом PSI [10; 11] выявлены недостатки использования радарных данных в диапазонах X (3 см) и C (5,6 см). Площадь мониторинга ограничивается промышленной и городской застройкой, кустарниковая и травяная растительность маскирует поверхность грунта. Данные радиолокатора PALSAR в диапазоне L (23 см) с большей проникающей способностью позволяют расширить площадь мониторинга и определить смещения также для элементов микрорельефа земной поверхности [5; 12; 15].

Геодинамический мониторинг на нефтегазовых месторождениях с мульдами оседания проводится на основе геодезических измерений. Установлено, что сейсмическим событиям и микроземлетрясениям на разбуренной площади месторождения предшествуют поднятия поверхности и последующие интенсивные оседания, вызванные разгрузкой массива [16]. Это можно рассматривать как деформационный предвестник техногенных сейсмических явлений и использовать в контроле смещений на месторождениях спутниковую интерферометрию.

### **Программный комплекс оценки смещений техногенных объектов**

Программа высокоточной оценки смещений техногенных объектов [17] разработана на основе StaMPS (Stanford Method for Persistent Scatterers) [18], используемого для расчета скоростей смещений и временных рядов смещений. StaMPS апробирован при использовании ре-



зультатов обработки спутниковых радарных данных. Основная вычислительная часть комплекса реализована при помощи MATLAB.

Объемы данных могут превышать 200 Гб. Для их оперативной обработки необходима распределенная обработка на высокопроизводительных вычислительных системах. Поэтому в программном комплексе реализована распределенная обработка данных в двух вариантах:

- а) независимая обработка матриц интерферометрических фаз, когерентностей, иных параметров съемки пар радиолокационных кадров;
- б) независимая обработка точек и подмассивов точек, соответствующих стабильным отражающим объектам.

### Обработка радарных данных ALOS и TERRASAR-X

При проведении экспериментальных исследований программного комплекса высокоточной оценки смещений техногенных объектов использованы следующие исходные радиолокационные данные:

- а) 18 кадров сенсора ALOS/PALSAR на территорию Самотлорского нефтяного месторождения, снятых в период с 2007 по 2011 г.;
- б) 11 кадров сенсора ALOS/PALSAR на территорию Губкинского газоконденсатного месторождения, снятых в период с 2007 по 2011 г.;
- в) 4 кадра сенсора TERRASAR-X на техногенную территорию Нижегородской области, снятые в период с февраля по март 2008 г.

Для оценки преимуществ распределенной обработки данных подготовлено три экспериментальные вычислительные системы:

- а) рабочая станция: 4-ядерный процессор Intel Xeon 3,2 ГГц с технологией гипертрейдинга, ОЗУ 12Гб, дисковая подсистема 4 × 2 Тб SATA;
- б) кластер из ЭВМ: кластер из четырех рабочих станций с идентичными аппаратными характеристиками, приведенными в пункте а);
- в) высокопроизводительный вычислительный кластер, состоящий из 128 узлов DELL PowerEdge M600 Server. При проведении экспериментальных исследований использовалось 22 вычислительных узла.

Обработка 18 кадров ALOS/PALSAR на территорию Самотлорского месторождения проведена на всех трех конфигурациях вычислительных систем. Объем обрабатываемых данных составил 195 Гб. Общее время вычислений по методу PSI в среде MatLab составило для конфигурации а – 40 часов, б – 3 часа, в – 2,4 часа. Таким образом, подтверждается преимущество распределенной обработки данных.

Для Самотлорского месторождения получены результаты:

- а) средняя точность расчета абсолютных высот отражающих объектов составляет 39 см;
- б) точность расчета скоростей смещений (в направлении линии обзора) отражающих объектов: минимальное значение 1 мм/год, среднее – 4 мм/год, максимальное – 17 мм/год;
- в) точность расчета вертикальной компоненты скоростей смещений отражающих объектов: минимальное значение 1 мм/год, среднее – 5 мм/год, максимальное – 21 мм/год;
- г) точность расчета горизонтальной компоненты скоростей смещений отражающих объектов: минимальное значение 1 мм/год, среднее – 4 мм/год, максимальное – 10 мм/год.

Для Губкинского месторождения получены следующие результаты:



а) средняя точность расчета абсолютных высот отражающих объектов составляет 72 см;

б) точность расчета скоростей смещений (в направлении линии обзора) отражающих объектов: минимальное значение 1 мм/год, среднее — 6 мм/год, максимальное — 23 мм/год;

в) точность расчета вертикальной компоненты скоростей смещений отражающих объектов: минимальное значение 2 мм/год, среднее — 7 мм/год, максимальное — 29 мм/год;

г) точность расчета горизонтальной компоненты скоростей смещений отражающих объектов: минимальное значение 1 мм/год, среднее — 4 мм/год, максимальное — 14 мм/год.

В феврале—марте 2008 г. проведены подспутниковые эксперименты, включавшие перемещение одного из трехгранных уголкового отражателей на 10 мм вертикально для оценки возможности отслеживания этих искусственных перемещений на основе радарной съемки. Опубликованные результаты подспутникового эксперимента доступны для исследователей [19]. В наземном эксперименте участвовало шесть уголкового отражателей. При этом три из них находились в стабильной западной зоне кадра и не испытывали перемещений земной поверхности. Три других находились в восточной зоне кадра и подвержены перемещениям земной поверхности. Уголкового отражателя, который искусственно перемещался, находился в стабильной западной зоне.

Для результатов PSI обработки данных TERRASAR-X на Нижегородскую область дополнительно проведена проверка точности расчета смещений искусственных уголкового отражателей за время между последовательными съемками. Точки, соответствующие искусственным отражающим объектам, были найдены на радарных кадрах TERRASAR-X на основе анализа индекса дисперсии амплитуды и для них были рассчитаны смещения между последовательными съемками.

На рисунке приведен график перемещений уголкового отражателя, рассчитанных с использованием разработанного программного комплекса. Однако вследствие того, что радарные данные покрывают короткий промежуток времени (1 месяц), они не пригодны для расчета скоростей смещений, о чем свидетельствует значительная погрешность расчета скоростей (более 20 см/год) для всех отражающих объектов, обнаруженных в ходе обработки на данной территории.

Для дальнейшего анализа результатов обработки радарных данных методом интерферометрии стабильных отражателей программный комплекс способен экспортировать материалы в следующих вариантах.

1. Отображение точек в формате KML в геопространственном сервисе Google Maps в форме точек, выкрашенных в соответствии со скоростью смещений постоянных отражателей (рис.). Для каждой точки при ее интерактивном выборе отражается временной ряд смещений. Для отображения используются сервер публикации геопространственных данных GeoServer, СУБД PostgreSQL и надстройки PostGIS.

2. Экспорт точек и соответствующих параметров обработки в ГИС ArcGIS с использованием опубликованного в GeoServer WMS сервиса.

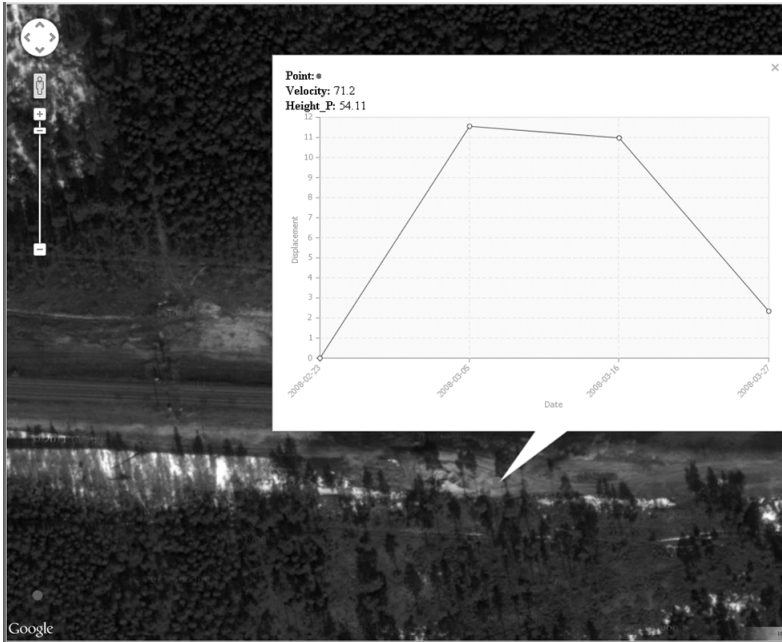


Рис. Смещения уголкового отражателя, перемещаемого на 10 мм вверх и обратно в подспутниковом эксперименте

3. Интерполяция параметров точек (высота, скорость смещений, вертикальная и горизонтальная компонента скорости смещений, погрешность расчета высоты, погрешность расчета скоростей смещений) до однородной геопривязанной сетки и экспорт в формат ГИС ENVI.

4. Экспорт координат точек и результатов расчетов в векторном формате в ГИС ENVI. Координаты точек могут быть представлены в системе координат радиолокатора (наклонная дальность, азимут) или географической системе координат (долгота, широта).

Для Самотлорского месторождения [4; 17] проведена дополнительная проверка точности расчета смещений на основе совместного анализа результатов обработки в программном комплексе и материалов наземных измерений на пунктах Самотлорского геодинамического полигона. Использованы материалы наземных измерений, включающие нивелировку II класса повышенной точности. При этом измерения выполняются ежегодно только в летний сезон. Разработанный комплекс позволяет объединить разнородные геопривязанные данные и на их основе рассчитать погрешность результатов обработки радарных данных. Средняя точность расчета вертикальных смещений отражающих объектов в результате такой проверки составила 4 мм/год.

### Заключение

Для обеспечения многопользовательского доступа при анализе результатов интерферометрической обработки разработано программное обеспечение для экспорта в формат KML с последующим отображением в Google Maps в он-лайн режиме с использованием технологии



хранения баз данных в СУБД PostgreSQL для среды GeoServer. Выполнена высокоточная оценка скорости смещений природных и техногенных объектов, длительное время стабильно отражающих радиолокационный сигнал и расположенных на Самотлорском нефтяном и Губкинском газоконденсатном месторождениях. Проверка и расчет погрешности полученных результатов проведены на основе материалов наземной геодезической съемки на пунктах геодинамического полигона.

Данные PALSAR предоставлены JAXA по грантам 07/JAXA/ASP №0704001 и 09/JAXA/AEO №022300. Данные TERRASAR-X предоставлены INFOTERRA GMBH по соглашению №25306.

*Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ по государственному контракту от 17.10.2011 №07.514.12.4027 в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007 – 2013 годы».*

151

### Список литературы

1. Комаров С. А., Миронов В. Л., Романов А. Н. и др. Методы дистанционного зондирования техногенных загрязнений в оптическом и радиодиапазонах // Оптика атмосферы и океана. 1993. Т. 6, №11. С. 1471 – 1477.
2. Миронов В. Л., Комаров С. А., Романов А. Н. и др. Измерение и алгоритмы обработки данных в задачах дистанционного зондирования уровня грунтовых вод // Исследование Земли из космоса. 1998. №4. С. 98 – 106.
3. Евтюшкин А. В., Еремеев А. В., Макеева М. А. Оперативная тематическая обработка данных дистанционного зондирования на распределенных вычислительных ресурсах // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2008. №6. С. 7 – 13.
4. Филатов А. В., Евтюшкин А. В., Васильев Ю. В. Определение смещений техногенных объектов на территории нефтяных месторождений методом радарной интерферометрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, №2. С. 157 – 165.
5. Филатов А. В. Программа расчета скорости смещений постоянных интерферометрических отражателей (PSIVelocityComp) // Свидетельство о гос. регистрации программы на ЭВМ №2011611208. Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 04.02.2011.
6. Hooper A. Persistent scatterer radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation // PhD thesis. Stanford University. 2006.
7. Chen F., Lin H., Li Z. et al. Interaction between permafrost and infrastructure along the Qinghai – Tibet Railway detected via jointly analysis of C- and L-band small baseline SAR interferometry // Remote Sensing of Environment. 2012. Vol. 123. P. 532 – 540.
8. Захаров А. И., Захарова Л. Н., Лебедева М. А. Применение метода РСА интерферометрии для мониторинга оползневой активности на Северомуйском участке железной дороги // Материалы III Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» / ИРЭ РАН. 2009. С. 415 – 419.
9. Эпов М. И., Миронов В. Л., Чимитдоржиев Т. Н. и др. Исследование локальной геодинамики в районах повышенной сейсмической активности на территории Кузбасса по данным радиолокационной интерферометрии Alos Palsar // Материалы IV Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь» / ИРЭ РАН. 2010. С. 96 – 99.
10. Лысков И. А., Мусихин В. В., Кашиников Ю. А. Мониторинг деформационных процессов земной поверхности методом радарной интерферометрии // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. 2010. №5. С. 11 – 16.





11. Лысков И. А., Мусихин В. В., Кашиников Ю. А. и др. Определение зон сдвижений на подработанной территории верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) по результатам интерферометрической обработки радарных данных // Маркшейдерский вестник. 2011. №3. С. 34–39.
12. Filatov A., Yevtyushkin A. Detection of ground surface displacements in area of intensive oil and gas production by InSAR data // Proceedings of the ESA Living Planet Symposium. Bergen, Norway. 2010. ESA SP-686. European Space Agency, The Netherlands, Noordwijk.
13. Мельников Н. Н., Калашиник А. И., Калашиник Н. А. Техногенные геодинамические процессы при освоении нефтегазовых месторождений шельфа Баренцева моря // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2009. Т. 12, №4. С. 601–608.
14. Козлов С. А. Опасные для нефтегазопромысловых сооружений геологические и природно-техногенные процессы на западно-арктическом шельфе России // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». 2005. №1. URL: [http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov\\_2.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Kozlov/Kozlov_2.pdf).
15. Курбижекова И. И., Чимитдоржиев Т. Н., Тубанов Ц. А. и др. Результаты исследований динамики ледового покрова озера Байкал методами спутниковой радиолокации ALOS PALSAR и GPS навигации // Вестник Бурятского научно-центра СО РАН. 2012. №1(5). С. 42–59.
16. Кашиников Ю. А., Ашихмин С. Г., Букин В. Г. и др. Деформационные предвестники техногенных землетрясений при разработке месторождений углеводородов // Записки Горного института. 2010. Т. 188. С. 145–152.
17. Bryksin V. M., Filatov A. V., Yevtyushkin A. V. Using of SAR data and DInSar-PSInSar technique for monitoring Western Siberia and Arctic // Журнал радиоэлектроники. 2012. №6. С. 1–53.
18. Hooper A., Spaans K. StaMPS MTI Manual. URL: [http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/StaMPS\\_Manual\\_v3.2.pdf](http://radar.tudelft.nl/~ahooper/stamps/StaMPS_Manual_v3.2.pdf) (дата обращения: 20.01.2012).
19. Zakharov A. I., Mashurov S. S., Dragunov A. G. Application of TerraSAR-X Data for Monitoring of Potential Landslide and Karst Areas in Railway and Pipeline Corridors // Proceedings of the 8th European Conference on Synthetic Aperture Radar (EUSAR-2010), 2010. Eurogress, Aachen, Germany. P. 548–551.

#### Об авторах

Аркадий Викторович Евтюшкин – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: AYevtyushkin@kantiana.ru

Виталий Михайлович Брыксин – канд. техн. наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Антон Валентинович Филатов – канд. физ.-мат. наук, Балтийский федеральный университет им. И. Канта.

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru

#### Authors

Dr Arkadi Yevtyushkin – assistant professor, I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: AYevtyushkin@kantiana.ru

Dr Vitaliy Bryksin – I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: VBryksin@kantiana.ru

Dr Anton Filatov – I. Kant Baltic Federal University.

E-mail: AnFilatov@kantiana.ru